

Mémoire

Auteur : De Wandeleer, Laura

Promoteur(s) : Magain, Nicolas; 12733; 12758

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en biologie des organismes et écologie, à finalité spécialisée en biologie de la conservation : biodiversité et gestion

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/12545>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Influence de paramètres environnementaux et météorologiques sur l'activité des chiroptères dans un parc éolien en Région wallonne par suivi saisonnier - Le cas du parc de Mesnil-Saint-Blaise

Mémoire écrit par Laura De Wandeleer en vue de l'obtention du diplôme de Master en Biologie des organismes et écologie à finalité spécialisée en Biologie de la conservation : biodiversité et gestion, à l'Université de Liège.

Année académique 2020 - 2021

Promoteurs : Nicolas Magain (Université de Liège) & Yves Laurent (Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique)



Remerciements

Ce mémoire n'aurait pas pu être mené à bien, et jusqu'au bout, sans l'aide de certaines personnes que je souhaite sincèrement remercier.

Avant tout, merci à mes deux promoteurs Yves Laurent et Nicolas Magain. Je remercie Yves en particulier pour son aide à la réalisation et la mise en place du protocole, pour son accompagnement lors des premières sorties de terrain ainsi que pour les dates pour lesquelles je manquais d'un.e volontaire, pour la formation de qualité qu'il m'a offerte sur les analyses acoustiques ainsi que pour son soutien et ses encouragements pour terminer la saison de récolte des données qui fut particulièrement laborieuse. Merci aussi à Monsieur Magain pour sa patience et son investissement quotidien lorsqu'il s'agissait de répondre à des questions, m'aider à réaliser les analyses statistiques, et merci pour ses nombreuses relectures et commentaires constructifs sur la rédaction de mon mémoire.

Je remercie également tout.e.s les volontaires sans qui la réalisation de mon protocole n'aurait pas été possible et desquel.les la compagnie et l'intérêt furent toujours un plaisir. Merci à Claire Ory, Emeline Aupy, Perrine Renard, Caroline Mota, Anissa El Mojahid, Juliette Scheuer, Chloé Beaugendre, Victoria De Cuyper, Margaux Vanhussel, Clément Ganier, Sébastien Laurent, Coralie Mullender, Arnaud Boulenger, Axelle Freixinos, Marine Chiarello. Merci tout particulièrement à Coraline Lafourt qui m'a accompagnée sur à peu près la moitié de toutes mes soirées de terrain, qui m'a tant appris et qui m'a permis de profiter pleinement de mes sorties de terrain même lorsque la fatigue se faisait ressentir. Merci aussi à Nils Bouillard d'être venu m'aider et avec qui les discussions furent enrichissantes pendant le terrain et après lorsqu'il s'agissait de discuter de mes résultats.

Merci à Quentin Smits, Thierry Kervyn, Jérémy Simar, Laurent Declaye, Maxime Kelder et Delphine Rensonnet de m'avoir accordé leur temps pour des entretiens afin de discuter du contexte global de mon sujet de mémoire.

Merci également au comité de lecture de mon mémoire composé de Quentin Smits, Roseline Beudels et Johann Delcourt.

Finalement, je tiens à remercier tout particulièrement les membres de ma famille ainsi que mon compagnon qui se sont intéressés à mon travail et qui sont également venus m'aider sur le terrain. Leur soutien fut précieux, particulièrement lors de la phase de rédaction pour laquelle ils m'ont aussi aidé.

Résumé

Influence de paramètres environnementaux et météorologiques sur l'activité des chiroptères dans un parc éolien en Région wallonne par suivi saisonnier - Le cas du parc de Mesnil-Saint-Blaise.

Mémoire réalisé par Laura De Wandeleer au cours de l'année académique 2020 - 2021, encadré par Yves Laurent (IRSNB - Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique) et Nicolas Magain (Biologie de l'Évolution et de la Conservation, Université de Liège).

Le développement des énergies renouvelables, dont l'industrie éolienne, est en plein essor afin de répondre aux enjeux climatiques. Cependant, il a été prouvé que les parcs éoliens avaient des impacts néfastes sur la faune sauvage : destruction des habitats pour la construction des éoliennes, fragmentation de l'habitat, ou encore accidents liés aux pales en mouvement. Ce sont principalement les oiseaux et les chiroptères qui sont touchés par la présence des parcs éoliens. La totalité des espèces de chauves-souris belges étant protégées, il est primordial d'optimiser la construction de telles infrastructures ainsi que leur activité. Pour ce faire, il faut connaître les paramètres qui influenceraient leur présence et leur comportement. C'est ce que cette étude a tenté de faire à l'échelle du parc éolien de Mesnil-Saint-Blaise en province de Namur. Les objectifs spécifiques de l'étude sont, d'une part, de comprendre quelles conditions météorologiques influencent l'activité des chauves-souris et le type d'effet qu'elles auraient. D'autre part, l'étude a tenté de mettre en évidence des effets de certains éléments de l'environnement. Le comportement de chasse a également fait l'objet d'analyses. Des paramètres environnementaux et météorologiques ainsi que des enregistrements acoustiques ont été prélevés sur un transect de < 2 km sur lequel étaient répartis 27 points d'écoute. La récolte de données a eu lieu du 16/03/21 au 18/06/21 inclus avec un rythme de sorties de terrain tous les 4 jours (25 sorties de terrain au total). Toutes les chauves-souris enregistrées ont été identifiées sur base de leurs propriétés acoustiques. Les données ont exclusivement été testées par des modèles de régression linéaires de types logistiques (variables réponses binaires). Les résultats concernant les variables météorologiques ont montré un effet positif des températures et un effet négatif de la vitesse du vent sur la présence de chauves-souris, ce qui confirme ce qui est trouvé dans la littérature. Concernant les variables environnementales, cette étude a notamment mis en évidence une influence positive de la floraison des haies et de la présence d'un ruisseau, et un effet négatif des cultures de graminées et de la présence d'accotements. Des études à plus large échelle spatio-temporelle sont nécessaires afin de pouvoir mettre en évidence ce genre d'effets plus globalement.

Table des matières

Introduction	1
Les énergies renouvelables	1
Impacts des parcs éoliens sur l'avifaune	3
Impacts des parcs éoliens sur les chiroptères	4
Modification de l'habitat - effet indirect	5
Collisions et barotraumatisme - effets directs	5
Système d'écholocalisation et limites	7
Fréquentation des éoliennes par les chauves-souris	10
Facteurs aléatoires	10
Facteurs non aléatoires - Les hypothèses de l'attraction	10
Hypothèse 1 : Le bruit et le mouvement des éoliennes attirent les chauves-souris	10
Hypothèse 2 : L'éolienne comme potentiel gîte ou site de reproduction	10
Hypothèse 3 : L'éolienne attire des insectes qui attirent des chauves-souris	11
Taux de mortalité des chauves-souris en Europe	11
Variation interspécifique et intraspécifique	12
Variation spatiale et temporelle	14
Importance de la conservation des chauves-souris	14
Biodiversité	15
Services écosystémiques	15
Statuts de protection en Europe	15
Contexte et objectifs de l'étude	16
Objectifs de l'étude	17
Matériel et méthodes	18
Récolte des données	18
Site de l'étude	18
Design expérimental	19
Données environnementales	20

Enregistrements acoustiques	21
Données météorologiques	22
Informations supplémentaires	22
Analyse des enregistrements - Traitement & Identifications	22
Kaleidoscope Pro V. 5.1.9 (Wildlife Acoustics, Maynard, USA)	22
BatSound V. 1.3.1 (Pettersson Elektronik, Uppsala, Suède)	23
Traitement de la base de données et analyses	24
Traitement de la base de données	24
Analyse exploratoire	25
Analyses statistiques	25
Influence des paramètres météorologiques (Q1 - Q2)	26
Influence des paramètres environnementaux (Q3 - Q10)	27
Résultats	31
Analyse exploratoire	31
Exploration de l'échantillon	31
Distribution temporelle des espèces sur la période de récolte des données	33
Distribution spatiale des espèces enregistrées sur le transect	34
Analyses statistiques	35
Influence des paramètres météorologiques (Q1 - Q2)	35
Q1 : Les paramètres météorologiques influencent-ils la présence de chauves-souris ?	35
Q2: Les paramètres météorologiques influencent-ils le comportement de chasse des chauves-souris ?	36
Influence des paramètres environnementaux (Q3- Q11)	37
Q3 - Q7: La floraison de certains éléments de l'habitat influence-t-elle la présence de chauves-souris ?	37
Q8: Les paramètres environnementaux influencent-ils la présence de chauves-souris ?	38
Q9: Les paramètres environnementaux influencent-ils le comportement de chasse des chauves-souris ?	39
Q10: La présence d'éolienne influence-t-elle la présence de chauves-souris sur le site de l'étude ?	40

Discussion	50
Influence des paramètres météorologiques sur la présence et le comportement de chasse des chauves-souris (Q1 - Q2)	40
Influence des paramètres environnementaux sur la présence et le comportement de chasse des chauves-souris (Q3 - Q10)	42
Limites de l'étude	47
Biais du protocole	47
Biais liés au suivi chiroptérologique par l'acoustique	48
Perspectives - Mesures de conservation des chiroptères, cas du parc éolien de Mesnil-Saint-Blaise	49
Conclusion	50
Bibliographie	51
Annexes	58

Liste des figures

Figure 1 : Proportion des sources d'énergie pour la production électrique belge en 2020.....	2
Figure 2 : Types de sons émis représentés sur sonogrammes.....	7
Figure 3 : Représentation schématique des différentes mesures sur sonogramme pour l'analyse acoustique.....	8
Figure 4 : Représentation des différents comportements d'une chauve-souris sur base du sonogramme.....	9
Figure 5 : Représentation cartographique du site de l'étude.....	18
Figure 6 : Matériel emporté.....	20
Figure 7 : Distribution temporelle (aa-mm-jj) des chiroptères enregistrés pendant la récolte de données.....	33
Figure 8 : Répartition spatiale (HAB) des chiroptères enregistrés.....	34
Figure 9 : Représentation de la composition de l'habitat 26 et proportions des différents micro-habitats.....	43
Figures 10 : Représentation de la composition des habitats 05 (a) et 20 (b) et proportions des différents micro-habitats.....	45
Figures 11 : Représentation de la composition des habitats contenant une éolienne.....	46
Figure 12 : Représentation schématique des étapes du suivi chiroptérologique par une méthode acoustique.....	48

Liste des tableaux

Tableau 1 : Variation interspécifique du taux de mortalité des chauves-souris en Europe et comportements à risque.....	13
Tableau 2 : Traitement de la base de données en vue de la préparer aux analyses.....	24
Tableau 3 : Regroupement de variables incluses dans la régression logistique (Q9 et Q10).....	29
Tableau 4 : Synthèse de l'analyse exploratoire de l'échantillon.....	32
Tableau 5 : Synthèse des résultats significatifs du modèle 1a.....	35
Tableau 6 : Synthèse des résultats significatifs des modèles 1b et 1c.....	36
Tableau 7 : Synthèse des résultats significatifs du modèle 2.....	37
Tableau 8 : Synthèse des résultats des modèles 3 à 7.....	37
Tableau 9 : Synthèse des résultats significatifs du modèle 8a.....	38
Tableau 10 : Synthèse des résultats significatifs des modèles 8b et 8c.....	39
Tableau 11 : Synthèse des résultats significatifs du modèle 9.....	40
Tableau 12 : Comparaison des conditions météorologiques lors des sorties de terrain du 19/03 et du 13/04.....	41

Liste des annexes

Annexe I : Exemples de sonogrammes d'espèces belges	a
Annexe II : Sites d'intérêt biologique autour de la zone d'étude	b
Annexe III : Fiches de terrain	c
Annexe IIIa : Inventaire des différents micro-habitats présents au sein des habitats et distinction des paramètres fixes et variables de ceux-ci	c
Annexe IIIb : Horaire à respecter pour les enregistrements (exemple du 13 avril 2021)	d
Annexe IIIc : Fiche météo (exemple du 4 avril 2021)	d
Annexe IV : Paramètres des logiciels utilisés	e
Annexe IVa : Paramètres fixés pour Kaleidoscope	e
Annexe IVb : Exemple d'un sonogramme, d'un spectre de puissance et d'un oscillogramme sur Batsound	f
Annexe IVc : Paramètres choisis pour BatSound	g
Annexe V : Base de données pour les analyses	h
Annexe Va : Aperçu de la base de données importée dans le logiciel RStudio	h
Annexe Vb : Contenu de la base de données - Types de variables	i
Annexe VI : Proportions des micro-habitats dans chaque habitat	j
Annexe VI' : Graphiques réalisés mais non exploités dans le manuscrit	l

Liste des abréviations

- **EPTSER:** *Eptesicus serotinus* (Sérotine commune)
- **FC:** Fréquence constante
- **FM:** Fréquence modulée
- **FMQC:** Fréquence modulée quasi-constante
- **GLM:** Generalized Linear Model
- **MYODAU:** *Myotis daubentonii* (Murin de Daubenton)
- **MYOEMA:** *Myotis emarginatus* (Murin émarginé)
- **MYOGR:** Groupe rassemblant le genre *Myotis* et le genre *Plecotus*
- **MYOMYO:** *Myotis myotis* (grand Murin)
- **MYONAT:** *Myotis nattereri* (Murin de Natterer)
- **NYCNOC:** *Nyctalus noctula* (Noctule commune)
- **PIPGR:** Groupe rassemblant le genre *Pipistrellus*
- **PIP NAT:** *Pipistrellus nathusii* (Pipistrelle de Nathusius)
- **PIPPIP:** *Pipistrellus pipistrellus* (Pipistrelle commune)
- **PIPPYG:** *Pipistrellus pygmaeus* (Pipistrelle pygmée)
- **RHIFER:** *Rhinolophus ferrumequinum* (grand Rhinolophe)

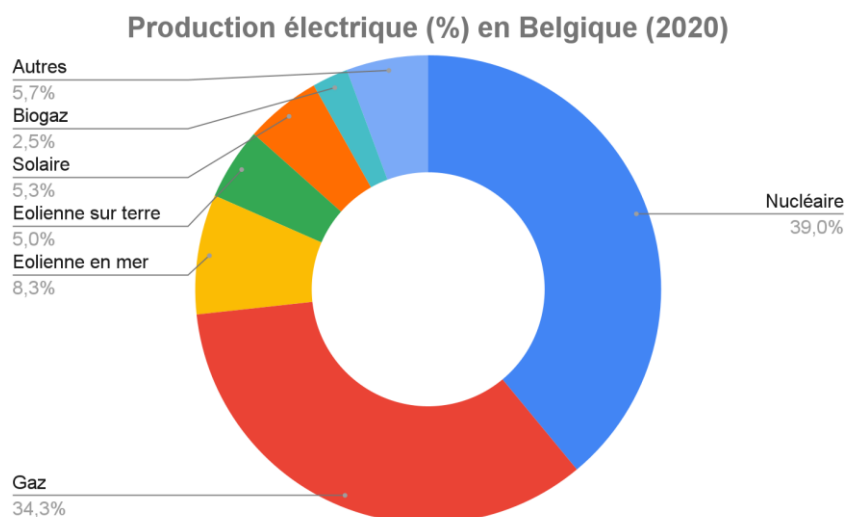
Introduction

Le changement climatique et la crise de la biodiversité sont des sujets sensibles. Sensibles dans le sens où ils sont encore largement débattus, étudiés, et surtout qu'ils annoncent de potentielles lourdes conséquences sur l'humanité. Ces deux sujets vont de pair et sont de plus en plus inclus dans des objectifs individuels et politiques. Ils feront partie intégrante de l'événement ayant lieu à Glasgow, du 31 octobre au 12 novembre 2021 : la COP26 (COP26, 2021). Mais ce n'est pas tout ce qui marquera l'année 2021 d'un profond changement ; la pandémie du virus SARS-CoV-2 a mis en évidence certaines fragilités dans le fonctionnement du système économique en Belgique notamment (GWEC, 2021). De nombreuses initiatives aux échelles individuelle et politique émergent et fixent des objectifs de durabilité. Parmi ceux-ci, le développement des énergies renouvelables. Par exemple, l'Union européenne vise comme objectif la neutralité en termes d'émission de gaz à effet de serre d'ici 2050 (Conseil européen, 2021).

Les énergies renouvelables

Les **énergies renouvelables** sont en plein essor et ont pour objectif de limiter l'accélération du changement climatique. En effet, en utilisant des sources renouvelables d'énergie comme le vent, le soleil, la géothermie, l'hydraulique et la biomasse, la consommation de combustibles fossiles peut être petit à petit remplacée. Les énergies renouvelables sont "plus propres, plus sûres, moins chères, et consomment moins d'eau" que les énergies fossiles, dit Morten Dyrholm le président du GWEC, le *Global Wind Energy Council*. Économiquement parlant, ces énergies renouvelables sont rentables ; un dollar investi dans la transformation énergétique durable rapporterait 3 à 7 dollars de profit (GWEC, 2021). En 2020, la production d'électricité en Belgique fut principalement générée par l'énergie nucléaire (39,1 %), puis le gaz (34,4 %), et l'énergie éolienne (13,3 % incluant les installations en mer et sur terre) (Figure 1) (Elia Group, 2020).

Figure 1 : Proportion des sources d'énergie pour la production électrique belge en 2020 (Elia Group, 2020).



La production électrique par l'**énergie éolienne** n'est donc pas négligeable dans le développement des énergies renouvelables. A l'échelle européenne, l'éolien a fourni 10 % des besoins en électricité en 2014 (Perrow, 2017). L'énergie éolienne semble alors prometteuse et est en plein essor. Le taux de croissance mondial de l'industrie éolienne en termes de production énergétique sur les 5 prochaines années est de 0,3 % pour les installations sur terre et de 31,5% pour les éoliennes en mer. Les installations en mer contribuaient à 6,5 % de la production énergétique globale en 2020 et contribueront à 21% en 2025 selon ces perspectives. En 2020, l'augmentation globale de production d'énergie éolienne fut de 59 % par rapport à 2019. L'année 2021 est celle pour laquelle l'industrie éolienne compte le plus de nouvelles installations (GWEC, 2021). Étant en plein essor, l'industrie éolienne évolue aussi en termes de design et d'efficacité des éoliennes. Le modèle le plus commun est celui à 3 pales. Il aurait comme avantages d'être moins bruyant et d'être structurellement équilibré. Pour une éolienne commune, la pointe d'une lame peut atteindre 150 m de hauteur. Les pales en rotation peuvent être entre 40 et 120 m au-dessus du sol (Perrow, 2017). La durée de vie moyenne d'une éolienne est d'environ 20 ans et une éolienne demande un entretien 2 à 3 fois par an¹. Lorsque plusieurs éoliennes (au moins 2) produisent de l'électricité et partagent un même réseau électrique, on parle de parc éolien et certaines caractéristiques émergent en leur sein.

Les **parcs éoliens créent un microclimat** caractérisé par certaines conditions aérodynamiques et thermodynamiques. Ces conditions sont suffisamment différentes de celles autour du parc pour que cela puisse avoir un impact sur la structure et la fonction de certains écosystèmes sous

¹ Notes personnelles suite à des entretiens en visioconférence (2021) avec des représentants de Luminus dont KELDER Maxime et RENSONNET Delphine, ainsi que LAURENT Yves.

et sur terre, ainsi que sur l'agriculture pratiquée aux pieds du parc par exemple. Une étude montre que, au sein d'un parc éolien, un réchauffement d'1°C a lieu la nuit ainsi qu'une augmentation de la respiration des végétaux. Le jour, un refroidissement de moins d'1°C se produit et les éoliennes amélioreraient l'assimilation de carbone par les plantes. Cependant, ces changements ne sont pas suffisants pour voir une différence significative dans le rendement des cultures. Les éoliennes influencent le fonctionnement des écosystèmes de par des changements de vitesse et de direction du vent, de turbulences, d'ombres, les fluctuations de pression et de température, et des ondes sonores. Des grands parcs éoliens continentaux pourraient avoir un impact à échelle plus large sur les précipitations et la nébulosité, mais plus d'études sont nécessaires. Les types d'écosystèmes ainsi que les différentes régions et le climat associé peuvent répondre différemment à la création du microclimat par le parc éolien, donc subir des effets différents. Les études à ce sujet ne sont pas encore suffisantes pour tirer des conclusions globales (Perrow, 2017).

Impacts des parcs éoliens sur l'avifaune

Malgré les intentions et effets positifs de la construction de parcs éoliens pour le ralentissement du changement climatique, ils ne sont pas dénués de tout autre impact. Les parcs éoliens ont des **effets sur la vie sauvage**, en particulier les oiseaux et les chauves-souris (Perrow, 2017).

En ce qui concerne l'**avifaune** présente dans un parc éolien, deux conséquences majeures existent: le déplacement des individus et le risque de collision.

L'installation de parcs éoliens perturbe une partie de l'avifaune car les individus concernés vont éviter de passer dans ces parcs ("effet de barrière") pour se nourrir et se reposer. Un des groupes les plus concernés par cette perturbation sont les Anseriformes (dont la famille des Anatidés par exemple). Ils sont pour la plupart migrateurs. Leurs sites d'hivernage en région tempérée sont des milieux ouverts, où ils rencontrent donc des parcs éoliens. De façon générale, il semble que c'est la période de construction des éoliennes qui provoque le plus de perturbations et donc d'évitement des oiseaux, par rapport à la période où l'éolienne est opérationnelle. Cependant, il a aussi été démontré que certaines espèces se délocalisaient en se rapprochant des parcs éoliens car la transformation de l'habitat due à l'installation de ceux-ci est en fait favorable à certaines espèces. D'autres groupes d'espèces comme les rapaces et les passereaux ne montrent pas (ou peu) de comportements d'évitement des éoliennes. Ce sont ces groupes qui seraient donc les plus vulnérables face aux risques de collision (Perrow, 2017).

Les espèces les plus touchées par les collisions sont celles dont les individus volent et planent souvent, ainsi que les espèces prédatrices (par exemple : aigle royal, vautour fauve, pygargue à queue blanche, mouettes, sternes, et certains rapaces nocturnes) (Drewitt & Langston, 2008). Différents facteurs entrent en compte dans le risque de collision. D'une part les facteurs liés à l'espèce (morphologie et comportement, vue, corridors migratoires et mouvements locaux), et d'autre part les facteurs liés aux parcs éoliens (design des éoliennes, leur disposition dans le parc et les lumières émises) (Perrow, 2017).

En Belgique, le parc éolien de Zeebrugge compte 25 éoliennes. Le taux de collision par éolienne et par an est estimé à 6-7 collisions (6,7). Les espèces les plus touchées en Belgique sont le groupe des sternes (Everaert & Stienen, 2007).

Dans un contexte beaucoup plus global, des études ont comparé les taux de mortalité d'oiseaux liés aux parcs éoliens par rapport à d'autres infrastructures anthropiques et les résultats sont en faveur des parcs éoliens. En effet, les parcs éoliens provoquent moins de mortalité, d'une part, que les lignes électriques, les immeubles, le trafic et les tours de communication (Calvert *et al.*, 2013 ; Erickson *et al.*, 2014). D'autre part, la production d'énergie par les combustibles fossiles et l'énergie nucléaire sont plus dangereux pour l'avifaune que les parcs éoliens (Sovacool 2009 ; 2013). L'idée n'est donc pas d'interdire l'éolien, mais plutôt de développer cette industrie dans la direction du respect de la vie sauvage et de la durabilité (Perrow, 2017).

Impacts des parcs éoliens sur les chiroptères

Le taux de mortalité des chauves-souris dû aux éoliennes dépasse largement celui des oiseaux en Amérique du nord ainsi qu'en Europe. A titre d'exemple, il est estimé que le taux annuel de mortalité des oiseaux aux USA est de 573 000 individus, alors que celui des chauves-souris est estimé de 880 000 individus (Smallwood, 2013).

Globalement, environ 1 million de chauves-souris sont tuées par an dans les parcs éoliens. Les impacts, létaux ou non, des parcs éoliens sur les chauves-souris sont dus soit à une cause indirecte comme la modification de l'habitat, soit des causes directes telles que les collisions ou le barotraumatisme (Perrow, 2017).

Modification de l'habitat - effet indirect

Pendant la construction ou le démantèlement d'éoliennes, les habitats sont modifiés et perturbés.

D'une part, les chauves-souris (et la faune en général) peuvent être dérangées par le bruit et la poussière provoqués par la construction des éoliennes (Perrow, 2017). Ceci dit, en Europe, certaines constructions peuvent être arrêtées si elles sont situées proches d'une colonie de maternité par exemple (Rodrigues *et al.*, 2008 ; 2015).

D'autre part, la création de routes et d'autres infrastructures pour la maintenance des éoliennes induit la fragmentation et l'altération de l'habitat (Perrow, 2017)(Vanpeene, 2018).

De plus, toute modification dans les zones humides (drainage par exemple) va aussi impacter les chauves-souris car dans ces habitats, la densité d'insectes dont elles se nourrissent est plus élevée (Barclay, 1991).

Ensuite, la construction d'un parc éolien peut provoquer une perte d'habitat par dégradation en supprimant des haies et des arbres pour libérer la zone. S'il y a déforestation pour l'installation d'un parc, ce sont des gîtes que perdent les espèces forestières, et des lieux de gagnage² pour les espèces qui se nourrissent en forêt (Perrow, 2017). D'un autre côté, la création d'une néo-lisière permet un nouveau corridor pour le passage et un lieu de gagnage pour les espèces se nourrissant au niveau des lisières (Morris *et al.*, 2010 ; Verboom & Huitema, 1997).

Collisions et barotraumatisme - effets directs

Les accidents tels que les collisions et le barotraumatisme ont lieu pendant l'activité du parc éolien, lorsque les chauves-souris se rapprochent des éoliennes (Vanpeene, 2018).

Collisions avec les pales en mouvement

Des événements de collision avec d'autres grandes infrastructures (hauts bâtiments, ...) sont rares pour les chauves-souris (Crawford & Baker, 1981) car leur système d'écholocation leur permet de les détecter et de les éviter. Il n'a pas non plus été reporté des cas de collision de chauves-souris avec la tour de l'éolienne ou avec une pale qui n'est pas en mouvement (Arnett *et al.*, 2008), même dans des études ayant utilisé des caméras thermiques (Cryan *et al.*, 2014 ; Horn *et al.*, 2008). Les pointes des pales peuvent atteindre une vitesse de 300 km/h

² Un lieu de gagnage est un endroit où les individus se nourrissent.

(Perrow, 2017 ; Vanpeene, 2018). Il existe aussi des blessures non fatales provoquées par des collisions. En effet, certains individus ont été trouvés blessés mais vivants au pied d'éoliennes et ont pu être soignés et relâchés (Klug & Baerwald, 2010). Cependant, les individus blessés qui n'auraient pas été retrouvés par des humains sont certainement morts car il est difficile pour eux de décoller du sol pour s'envoler (il leur faut profiter d'une certaine vitesse de vent et donc tomber d'une certaine hauteur pour s'envoler). Cela signifie que le taux de mortalité calculé sous-estime la mortalité réelle car une proportion de la mortalité n'est pas mesurée (Perrow, 2017).

Barotraumatisme

Le barotraumatisme se produit lors d'un changement brutal de la pression de l'air (Baerwald *et al.*, 2008). Lorsqu'un individu s'approche d'une pale en mouvement, il peut subir une chute brutale de la pression de l'air (Vanpeene, 2018) ce qui provoque l'endommagement de vaisseaux sanguins dans les tissus fins (les poumons peuvent se remplir de sang par exemple) et l'éclatement du tympan (Baerwald *et al.*, 2008 ; Brownlee & Whidden, 2011 ; Escobar *et al.*, 2015 ; Grodsky *et al.*, 2011 ; Rollins *et al.*, 2012 ; Vanpeene, 2018 ; Voigt *et al.*, 2015). Le barotraumatisme n'a pas encore été observé chez les oiseaux, ce qui est explicable par les systèmes respiratoires très différents entre les oiseaux et les mammifères, dont font partie les chiroptères (Baerwald *et al.*, 2008).

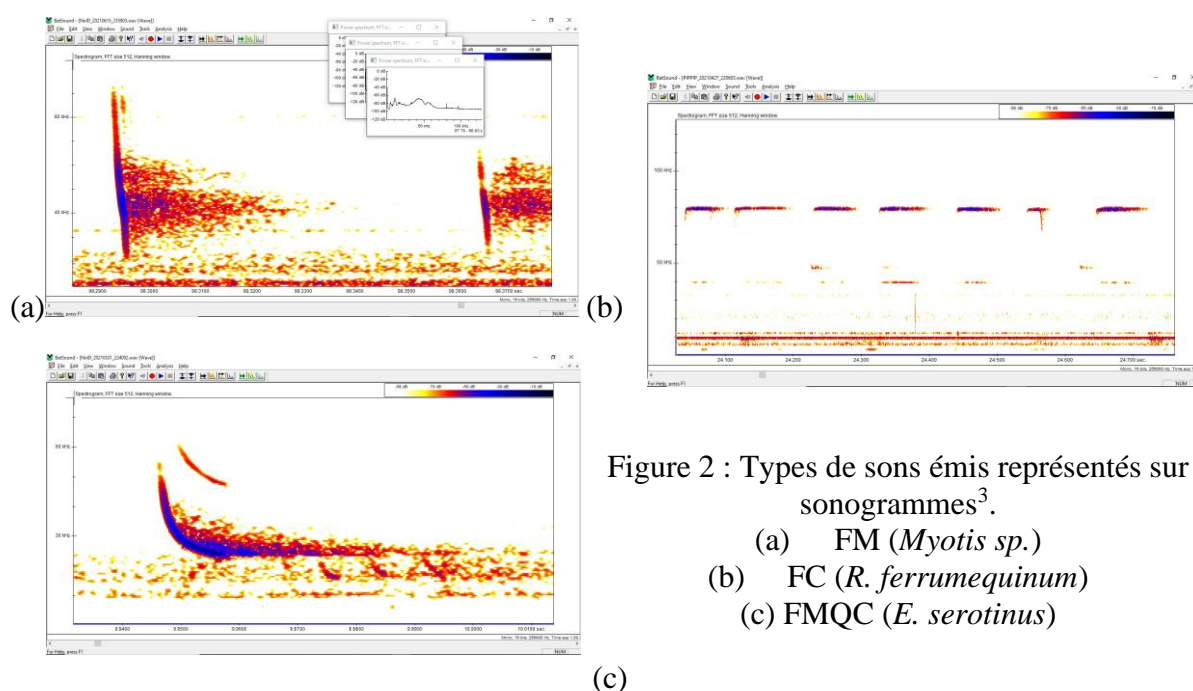
L'explication de la présence des chauves-souris autour des éoliennes fait encore débat. Encore aucune conclusion n'est tirée car les hypothèses sont difficiles à tester étant donné l'activité nocturne des chauves-souris (Perrow, 2017).

Une première explication pourrait résider dans le fait que malgré leur système d'écholocation, les chauves-souris ne seraient pas toujours capables de détecter les éoliennes pour les éviter. La seconde vient d'hypothèses proposant une certaine attraction des chauves-souris pour les éoliennes. Des facteurs aléatoires sont également avancés dans certaines hypothèses (Johnson *et al.*, 2004 ; Kunz *et al.*, 2007 ; Rydell *et al.*, 2010b).

Système d'écholocation et limites

Toutes les chauves-souris européennes sont dotées de la vue. Leur vision nocturne est comparable à celle de l'humain. Elles ont développé l'écholocation afin d'augmenter les informations “visuelles” pendant la nuit pour chasser leurs proies et éviter les obstacles (Perrow, 2017).

Le **principe** de l'écholocation se base sur l'analyse de l'écho que les individus reçoivent lorsque les ultrasons émis par les cordes vocales ou le nez rencontrent un objet (proie, obstacle, ...). Les ultrasons émis sont très variables selon les espèces en termes de fréquences, d'amplitude et d'intensité. Les types de sons émis peuvent être classés selon ces différents éléments. Il y a des espèces qui émettent leurs sons en fréquence dite modulée (FM), constante (FC), ou en fréquence modulée quasi-constante (FMQC) (Figure 2) (Arthur & Lemaire, 2015).



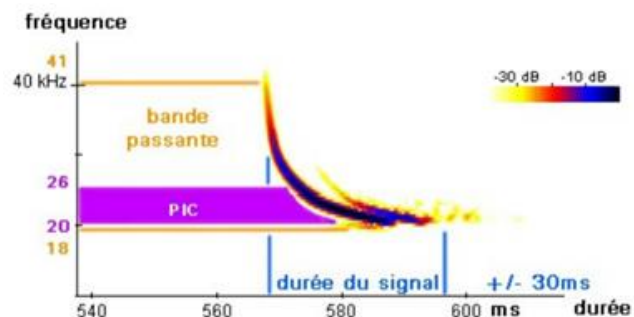
Les Murins (*Myotis sp.*) ainsi que les Oreillards (*Plecotus sp.*) émettent en fréquence modulée, tandis que les Rhinolophes (*Rhinolophus sp.*) émettent en fréquence constante. Les Pipistrelles (*Pipistrellus sp.*), les Sérotines (*Eptesicus serotinus* et *Vespertilio murinus*) et les Noctules (*Nyctalus sp.*) émettent en fréquence modulée quasi-constante. Certaines de ces espèces partageant des caractéristiques acoustiques similaires, des groupes ont été formés dans le cadre de cette étude afin de permettre le classement de certains individus non identifiables jusqu'à

³ Il s'agit de sonogrammes issus de l'analyse des données de cette étude.

l'espèce, sur base des sonogrammes. Les Murins et les Oreillards forment le groupe MYOGR, toutes les Pipistrelles constituent le groupe PIPGR, et les Sérotines et Noctules sont rassemblées dans le groupe des SÉROTULES. Les deux Rhinolophes (*R. ferrumequinum* et *R. hipposideros*) forment le groupe RHINO. Il est ainsi possible de déterminer, avec une analyse acoustique sur sonogrammes, à quel groupe l'individu détecté appartient. Une représentation non exhaustive des sonogrammes d'espèces belges figure en Annexe I.

Pour une analyse plus précise, il faut mesurer, entre autres, le pic d'intensité, la durée du signal et la largeur de la bande passante afin d'essayer d'identifier l'individu jusqu'à l'espèce (Figure 3). L'identification jusqu'à l'espèce n'est pas toujours aisée à cause de chevauchements dans certaines mesures du son.

Figure 3 : Représentation schématique des différentes mesures sur sonogramme pour l'analyse acoustique (schéma réalisé par Y. Laurent).



Les études basées sur l'acoustique des chiroptères pour leur suivi sont de plus en plus nombreuses. En effet, l'acoustique permet d'avoir une idée de la quantité de chauves-souris présentes dans un certain milieu et de la composition spécifique de la population. Il est plus juste de parler du nombre de contacts obtenus plutôt que d'abondance. En effet, l'analyse acoustique ne permet pas de déterminer avec certitude le nombre d'individus enregistrés. Toutefois, il est possible de distinguer la présence de plusieurs individus en même temps.

Les études acoustiques permettent également de déterminer l'activité des chauves-souris sur base de leur sonogramme. En effet, un individu qui passe, qui cherche (une proie), qui chasse, et qui capture une proie (comportement parfois appelé le “(feeding) buzz”), n'émet pas les ultrasons de la même façon (Figure 4) (CSBQ, s.d.). De plus, les chauves-souris émettent aussi des cris sociaux qui sont audibles (selon les espèces, entre 10 et 20 kHz) et qui auraient plutôt une fonction de communication (Pfalzer & Kusch, 2003).

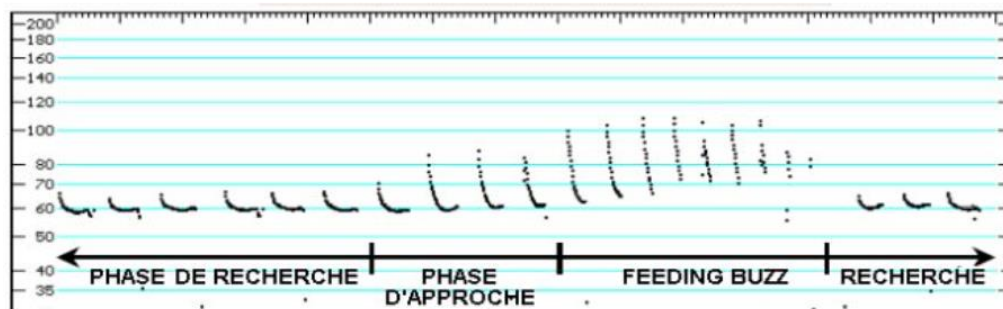


Figure 4 : Représentation des différents comportements d'une chauve-souris sur base du sonogramme (émission en FMQC). FEEDING BUZZ : capture d'une proie (CSBQ, s.d.).

Cependant, malgré son efficacité, le système d'écholocalisation a ses limites.

Limites

L'écholocalisation est un système génétiquement inné mais nécessite tout de même un certain apprentissage. En effet, les jeunes doivent apprendre quel type de son émettre selon les circonstances. De plus, reconnaître les obstacles représentant un potentiel danger fait partie des apprentissages des jeunes. Cela peut expliquer une partie des accidents à la période d'envol (fin de l'été - automne (Arthur & Lemaire, 2015)).

L'émission d'ultrasons, la réception de l'écho et son analyse représentent une consommation énergétique considérable pour les chiroptères. Cet investissement énergétique serait supérieur à celui qui est nécessaire pour voler (Speakman *et al.*, 1989). Pour les espèces migratrices en particulier, il est donc avantageux de ne pas écholocaliser constamment. D'une part parce qu'elles rencontrent peu d'obstacles durant leur voyage, et d'autre part parce que cela leur permet une économie d'énergie non négligeable. Cela pourrait expliquer une partie des accidents causés par les éoliennes (Kunz *et al.*, 2007).

De par certaines propriétés physiques des éoliennes, telles que leurs surfaces lisses, l'efficacité de l'écholocalisation peut être entravée à cause d'une potentielle diminution de l'intensité l'écho renvoyé, et d'un changement de direction des sons renvoyés (Perrow, 2017).

La portée du système d'écholocalisation n'est pas infinie. Elle peut varier selon les espèces et les comportements (Vanpeene, 2018).

Ces limites de l'écholocalisation pourraient, ensemble, expliquer pourquoi les chauves-souris sont vulnérables aux collisions et/ou au barotraumatisme lorsqu'elles fréquentent de trop près les éoliennes.

Fréquentation des éoliennes par les chauves-souris

Facteurs aléatoires

Selon la proposition des facteurs aléatoires, il s'agirait de l'effet d'être "au mauvais endroit au mauvais moment" (Cryan & Barclay, 2009). Cependant, selon certaines études, il y aurait plusieurs caractéristiques partagées par les chauves-souris ayant été victimes des éoliennes. Effectivement, les espèces volant dans des milieux ouverts et à de plus hautes altitudes (correspondant à la hauteur des pales d'éoliennes) sont plus à risque face aux éoliennes que d'autres espèces. En Europe, *P. nathusii*, la Pipistrelle de Nathusius, est particulièrement concernée. De plus, il a été montré qu'il y avait un pic de mortalité des chauves-souris en automne, moment de la migration et de l'envol des jeunes. Ces caractéristiques communes suggèrent que la présence des chauves-souris proches des éoliennes n'est pas vraiment liée à des facteurs aléatoires (Perrow, 2017).

Facteurs non aléatoires - Les hypothèses de l'attraction

Il s'agit ici de facteurs dits "non aléatoires" car ils dépendent notamment de la biologie des différentes espèces de chauves-souris. En effet, certaines espèces peuvent être attirées par les éoliennes car elles sont installées dans un habitat en particulier qui offre des ressources alimentaires ou des gîtes, ou encore parce que les bruits émis par les éoliennes et leur mouvement seraient attractifs (Cryan *et al.*, 2014 ; Kunz *et al.*, 2007 ; Rydell *et al.*, 2010b).

A) Hypothèse 1 : Le bruit et le mouvement des éoliennes attirent les chauves-souris

A une certaine distance, le bruit émis par les éoliennes semblerait attirer les chauves-souris, ainsi que les pales en mouvement lent, lorsque la vitesse du vent est faible. Des images thermiques montrent certaines chauves-souris s'approcher de différents éléments des éoliennes (la tour, la nacelle, et les pales) (Horn *et al.*, 2008 ; Rydell & Wickman, 2015). Cependant, d'autres études suggèrent que les chauves-souris ne sont pas attirées par le bruit et le mouvement des éoliennes, mais qu'elles auraient plutôt des comportements d'évitement (Minderman *et al.*, 2012).

B) Hypothèse 2 : L'éolienne comme potentiel gîte ou site de reproduction

Les chauves-souris peuvent se rapprocher des éoliennes lors de leur recherche de gîte ou de partenaire sexuel (Perrow, 2017). En effet, il semblerait que certaines espèces de chauves-

souris se rapprochent des éoliennes car elles pourraient les confondre avec de grands arbres, qui sont de potentiels gîtes (Horn *et al.*, 2008). De plus, l'automne (moment auquel le taux de mortalité est le plus élevé en Europe) correspond, avant la migration, à la période de reproduction. C'est donc à ce moment que des comportements sexuels ont lieu et ceux-ci provoqueraient un risque plus élevé de collision ou de barotraumatisme (Cryan, 2008). De plus, le taux de mortalité élevé en automne peut aussi s'expliquer par le fait que le nombre d'individus augmente car les jeunes commencent aussi à voler (Cryan *et al.*, 2012).

C) Hypothèse 3 : L'éolienne attire des insectes qui attirent des chauves-souris

Les chauves-souris peuvent être attirées par les éoliennes car les insectes dont elles se nourrissent sont eux-mêmes attirés par les éoliennes (Kunz *et al.*, 2007). Des études sont faites sur le contenu stomacal de chauves-souris mortes aux pieds d'éoliennes et révèlent qu'elles se sont nourries la nuit de leur mort, ce qui pourrait expliquer la raison de leur mort par collision ou barotraumatisme. En Europe, l'étude a été faite sur des pipistrelles communes (*Pipistrellus pipistrellus*) et des noctules de Leisler (*Nyctalus leisleri*) qui avaient encore des insectes frais dans leur estomac (Behr *et al.*, 2007).

Les raisons pour lesquelles les insectes seraient attirés par les éoliennes font encore l'objet de discussions. Certains pensent que c'est la couleur claire des éoliennes qui les attire. D'autres expliquent qu'en tant qu'ectothermes, les insectes vont se diriger vers des sources de chaleur comme le moyeu du rotor qui est plus chaud que l'air ambiant (Long *et al.*, 2011 ; Rydell *et al.*, 2010). Les lumières émises par les éoliennes peuvent aussi attirer les insectes (Nabli *et al.*, 1999).

Taux de mortalité des chauves-souris en Europe

En Europe⁴, le taux de mortalité estimé est de 2 chauves-souris par éolienne par an (Rydell *et al.*, 2012), ce qui correspond à quelques millions de chauves-souris tuées par an (Perrow, 2017). Rien qu'en Allemagne, la mortalité annuelle des chauves-souris liée aux parcs éoliens est estimée à 300 000 individus (Lehnert *et al.*, 2014 ; Voigt *et al.*, 2012).

Les risques à l'échelle des populations de chauves-souris peuvent être importants et peuvent menacer la survie de certaines d'entre elles, mais sont difficiles à prédire. En effet, les impacts

⁴ En Amérique du Nord, cette estimation s'élève à 3,7 chauves-souris par éolienne et par an (Rydell *et al.*, 2012).

au niveau des populations dépendent étroitement de la taille des populations ainsi que les causes et taux de mortalité naturelle. Pour concentrer les efforts de conservation efficacement, il faut une bonne connaissance de ces paramètres. Or, les tailles des populations et les taux de mortalité naturels spécifiques sont inconnus pour les chauves-souris (Perrow, 2017). Cependant, il est déduit que le taux de mortalité naturel des chauves-souris est généralement faible au vu de certains aspects de leur biologie. D'une part, le fait que ce soient des animaux à longue durée de vie (jusqu'à 20-30 ans (Wilkinson & South, 2002)), d'autre part, leur faible taux de reproduction (Barclay & Harder 2003). En effet, les femelles ne mettent pas qu'un (ou deux) jeune par an et ce, pour la majorité des espèces de chauves-souris, dont toutes les espèces belges. Ces deux aspects de leur biologie font que les populations de chauves-souris seraient sensibles à une faible augmentation de la mortalité (Perrow, 2017 ; Vanpeene, 2018).

Le taux de mortalité ne peut être expliqué par un seul facteur. Il s'agit d'une combinaison d'éléments qui peuvent provoquer de plus ou moins hauts risques de collision ou de barotraumatisme. Il existe une variation inter- et intra-spécifique, spatiale et temporelle (Perrow, 2017).

Variation interspécifique et intraspécifique

En Europe, les genres *Pipistrellus* (Pipistrelles) et *Nyctalus* (Noctules) représentent 86,6% des cas de mortalité liés à des accidents avec les éoliennes. En incluant les genres *Eptesicus* et *Vespertilio* (regroupant tous les deux des Sérotines), ce sont 93,3% des cas de mortalité qui sont englobés. A l'inverse, peu de cas de mortalité d'individus des genres *Plecotus* (Oreillards) et *Myotis* (Murins) ont été relevés (Tableau 1). En effet, de par leur méthode de vol (plus lent) et leur comportement alimentaire (proches de la végétation ou d'une surface d'eau), les murins sont moins vulnérables face au risque de collision ou de barotraumatisme (Perrow, 2017).

Pour chacune de ces espèces, le pic de mortalité est en automne (fin juillet-début octobre), représentant le moment où elles commencent leur migration (pour les espèces migratrices), et/ou le moment où elles vont chasser intensivement pour reconstituer leur réserve d'énergie en vue d'hiberner (ou pour préparer la migration) (Arnett *et al.*, 2008 ; Perrow, 2017 ; Rydell *et al.*, 2012 ; Vanpeene, 2018).

Tableau 1 : Variation interspécifique du taux de mortalité des chauves-souris en Europe⁵ et comportements à risque (tableau adapté de la Table 9.1 de Perrow, 2017).

Genre	Espèce	Mortalité (%)	Migration	Vol en altitude
<i>Pipistrellus</i>	<i>P. pipistrellus</i> (Pipistrelle commune)	20,7	Sédentaire	Oui
	<i>P. nathusii</i> (Pipistrelle de Nathusius)	14,8	Migratrice	Oui
	<i>P. kuhlii</i> (Pipistrelle de Kuhl)	4,5	Sédentaire	Oui
	<i>P. pygmaeus</i> (Pipistrelle pygmée)	4,0	Migratrice	Oui
	Non identifiée	17,9	/	/
<i>Nyctalus</i>	<i>N. leisleri</i> (Noctule de Leisler)	8,4	Migratrice	Oui
	<i>N. noctula</i> (Noctule commune)	15,2	Migratrice	Oui
	Non identifiée	0,4	/	/
<i>Vespertilio</i>	<i>V. murinus</i> (Sérotine bicolore)	2,3	Migratrice partielle	Oui
<i>Eptesicus</i>	<i>E. serotinus</i> (Sérotine commune)	1,4	Sédentaire	Oui
<i>Myotis</i>	<i>M. daubentonii</i> (Murin de Daubenton)	0,1	Sédentaire	Non
	<i>M. myotis</i> (grand Murin)	0,1	Migratrice (régionale)	Non
<i>Plecotus</i>	<i>P. austriacus</i> (Oreillard gris)	0,1	Sédentaire	Non
	<i>P. auritus</i> (Oreillard roux)	0,1	Sédentaire	Non

Concernant la variation intraspécifique, il ne serait pas surprenant que les juvéniles soient plus vulnérables face au risque de collisions ou de barotraumatisme car ils sont

⁵ Le Tableau 1 est un résumé et une adaptation du tableau original et ne reprend que quelques espèces d'intérêt dans le cadre de cette étude. Le total de 100 % n'est donc pas atteint dans le Tableau 1.

inexpérimentés et que leur vol peut être encore maladroit (Arnett *et al.*, 2008). Cependant, aucune étude ne permet de prouver cette variation intraspécifique, liée plutôt aux caractéristiques individuelles (sexe et âge). Les différences détectées seraient plutôt dues à la composition initiale de la population (Perrow, 2017).

Variation spatiale et temporelle

Le nombre d'accidents varie entre les parcs éoliens et au sein d'un même parc éolien car cela dépend aussi de la disposition des éoliennes. Les différences entre les parcs éoliens résident dans l'abondance de chauves-souris présentes sur le site (Baerwald & Barclay, 2011 ; Jain *et al.*, 2011), ainsi que du design des éoliennes construites. En effet, les éoliennes nouvelle-génération sont plus hautes et pourraient soit plus attirer les chauves-souris, soit leurs pales tournent dans un espace aérien plus utilisé par les chauves-souris (Barclay *et al.*, 2007 ; Rydell *et al.*, 2010a ; Georgiakakis *et al.*, 2012). Au sein d'un parc éolien, les éoliennes construites proches de sites favorables aux chauves-souris sont plus dangereuses que des éoliennes éloignées (Piorkowski & O'Connell, 2010 ; Rydell *et al.*, 2010b ; Santos *et al.*, 2013). Il en va de même pour les éoliennes qui sont aux extrémités du parc car ce sont celles que les chauves-souris en migration rencontrent en premier (Baerwald & Barclay, 2011).

Comme il l'a déjà été mentionné, le taux de mortalité semble plus élevé à la fin de l'été et au début de l'automne. De plus, cette période correspond aussi à des changements de comportements de l'entomofaune (mouvements migratoires, changements de distribution, ...). Ceci expliquerait le changement de comportement alimentaire de certaines espèces de pipistrelles et de noctules à cette période : elles se nourrissent davantage en milieu ouvert et à des hauteurs plus importantes par rapport à la période de printemps (Staton & Poulton, 2012 ; Kelm *et al.*, 2014).

La variation temporelle du taux de mortalité concerne aussi les variations entre les nuits, dépendantes de facteurs météorologiques tels que les précipitations, le clair de lune, la pression atmosphérique, la direction et la force du vent, et la température ambiante (Amorim *et al.*, 2012 ; Baerwald & Barclay, 2011 ; Jain *et al.*, 2011).

Importance de la conservation des chauves-souris

La mortalité et les impacts qu'ont les parcs éoliens sur les chauves-souris sont évidents. Cependant, l'expliquer n'est pas encore aisé. Ce qui rend la recherche compliquée pour vérifier

et tester les hypothèses est d'une part, le mode de vie nocturne des chauves-souris, et d'autre part, le manque d'information à propos de certains de leurs comportements.

Biodiversité

En Belgique, 24 espèces de chauves-souris sont présentes et se répartissent dans deux familles : les Vespertilionidés (22 espèces) et les Rhinolophidés (2 espèces) (Portail Wallonie, s.d.). Toutes les espèces de chauves-souris belges sont insectivores. Selon les espèces, elles se nourrissent de certains Lépidoptères, Arachnides, Coléoptères, d'insectes aquatiques, ... (Arthur & Lemaire, 2015).

Les chauves-souris font partie des **espèces parapluies**. En effet, les protéger ainsi que leur habitat permet indirectement la protection d'autres espèces profitant du même habitat (PNAC, s.d.).

Services écosystémiques

Les chauves-souris ont un rôle important au sein des écosystèmes qu'elles habitent et offrent des services écosystémiques (Kunz *et al.*, 2011). En effet, les chauves-souris sont parmi les plus grands consommateurs d'insectes volants (Perrow, 2017). Elles peuvent consommer, en une nuit, 2000-3000 insectes en "équivalent de poids de moustique" (Richardson, 1985). Dans les régions (sub-)tropicales, elles ont une fonction supplémentaire de pollinisatrices et de disperseurs de graines (Medellin & Gaona, 1999 ; Henry & Jouard, 2007 ; Fleming *et al.*, 2009).

Statuts de protection en Europe

En Europe, toutes les chauves-souris et leurs gîtes bénéficient d'un statut de protection stricte grâce aux législations nationales, à l'accord sur la conservation des populations de chauves-souris en Europe (EUROBATS, 2015) et grâce aux Directives Habitats (European Union, 1992) et Oiseaux (European Union, 2009) de l'Union Européenne. En effet, les parcs éoliens ne sont qu'une menace supplémentaire auxquelles les chauves-souris doivent déjà faire face : changement climatique, perte et fragmentation des habitats, changement des pratiques agricoles, pesticides, urbanisme, introduction de pathogènes comme celui du syndrome du nez-blanc, une épizootie particulièrement présente en Amérique du Nord (Leopardi *et al.*, 2015 ; Vanpeene, 2018).

Contexte et objectifs de l'étude

La production d'énergie éolienne est en plein essor et en plein développement, mais les impacts que les parcs éoliens ont sur la faune et la flore du site sont encore très peu connus. Etudier les impacts des parcs éoliens sur les chauves-souris n'est pas aisé car elles sont strictement nocturnes (Perrow, 2017). Ceci engendre un certain niveau de méconnaissance de leurs comportements, de potentiels facteurs qui influencent leur activité, *etc.* De ce fait, il est d'autant plus compliqué d'appliquer des mesures de conservation efficaces. Ces mesures de conservation diffèrent selon l'objectif à atteindre. Il existe des mesures de compensation, des mesures d'atténuation, et des mesures dites d'accompagnement⁶.

Les **mesures de compensation** sont celles qui cherchent à compenser un impact tel qu'un taux de mortalité élevé ou un taux de reproduction faible lié à une perte d'habitat. Par exemple, pour certaines espèces d'oiseaux, une mesure de compensation appliquée en parc éolien est de construire ou restaurer, plus loin, un habitat favorable à la nidification afin de compenser la perte de l'habitat lié à la construction du parc. Actuellement, en Wallonie, aucune mesure de compensation n'existe pour les chauves-souris. Ceci s'explique par le manque d'informations sur leur biologie et leurs comportements. Cependant, des mesures d'atténuation sont appliquées pour ces dernières. Les **mesures d'atténuation** ont pour objectif de diminuer un taux de mortalité par exemple. Dans le cas des chauves-souris, la mesure d'atténuation appliquée est le bridage des éoliennes. Il consiste à arrêter l'activité de l'éolienne lorsque les conditions supposées favorables aux chauves-souris sont rencontrées, ce qui permet de diminuer le risque de collisions et/ou de barotraumatisme⁶. En effet, cette mesure permet une diminution notable de la mortalité des chauves-souris (Arnett *et al.*, 2010). Néanmoins, pour protéger les chauves-souris efficacement, ces mesures sont encore trop peu nombreuses. Pour que le bridage des éoliennes soit optimal, il faut connaître les facteurs météorologiques qui influencent l'activité des chauves-souris.

Quelques études (dont Vanpeene, 2018) mettent déjà en évidence le lien entre la vitesse du vent et le risque de collisions, ainsi que la distance aux arbres et la pente du site. Certaines propriétés de l'habitat physique vont aussi influencer l'activité des chauves-souris, telles que la structure et la hauteur des arbres, la présence d'un point d'eau, *etc.* (Vanpeene, 2018).

⁶ Notes personnelles suite à un entretien en visioconférence (2021) avec des représentants du DEMNA et du DNF dont SMITS Quentin, KERVYN Thierry, SIMAR Jérémy et DECLAYE Laurent, ainsi que LAURENT Yves.

Cependant, les données sont encore trop peu nombreuses que pour mettre en place des mesures de compensation et pour optimiser l'efficacité du bridage des éoliennes.

Objectifs de l'étude

Dans le cadre de cette étude, des paramètres météorologiques et des caractéristiques de l'environnement (micro-habitats) seront étudiés pour tenter de mettre en évidence une influence significative sur l'activité des chauves-souris. Ceci dans le but de mieux comprendre comment elles réagissent à ces différents paramètres et de permettre, dans un contexte plus large, d'appliquer efficacement le bridage des éoliennes et d'imaginer d'éventuelles mesures de compensation pour renforcer la conservation des chauves-souris en Belgique.

Plus précisément, cette étude a pour objectifs spécifiques d'avoir une idée plus fine de la fréquentation des chauves-souris dans le parc éolien étudié et de voir si les espèces se répartissent différemment dans le parc selon les éléments de l'environnement et selon le temps. De plus, l'étude a pour objectif de répondre statistiquement aux questions suivantes :

Q1 : Les paramètres météorologiques influencent-ils la présence de chauves-souris ?

Q2 : Les paramètres météorologiques influencent-ils le comportement des chauves-souris ?

Q3 : La floraison des haies a-t-elle une influence sur la présence de chauves-souris ?

Q4 : La floraison des accotements a-t-elle une influence sur la présence de chauves-souris ?

Q5 : Le stade épis des cultures de graminées a-t-il une influence sur la présence de chauves-souris ?

Q6 : Le stade fleuri des cultures fourragères a-t-il une influence sur la présence de chauves-souris ?

Q7 : Le stade fleuri des cultures de colza a-t-il une influence sur la présence de chauves-souris ?

Q8 : Les paramètres environnementaux influencent-ils la présence de chauves-souris ?

Q9 : Les paramètres environnementaux influencent-ils le comportement des chauves-souris ?

Q10 : La présence d'éoliennes influence-t-elle la présence de chauves-souris ?

Matériel et méthodes

Récolte des données

Site de l'étude

Le site étudié est le parc éolien de Mesnil-Saint-Blaise, dans la commune de Houyet (Namur). Ce parc est composé d'une dizaine d'éoliennes, construites en plusieurs fois depuis 2009 par la société Vents d'Houyet (Vivre Ici, 2020). Un transect de 1,83 km passant par trois éoliennes (éoliennes A, B, C) a été tracé sur Google Earth Pro V.7.3 (Figure 5). Cette zone d'étude fut choisie de par la diversité d'habitats présente ; différents types de prairies, cultures de colza, de graminées et fourragères, bosquets, zones humides, sentiers, haies, ...

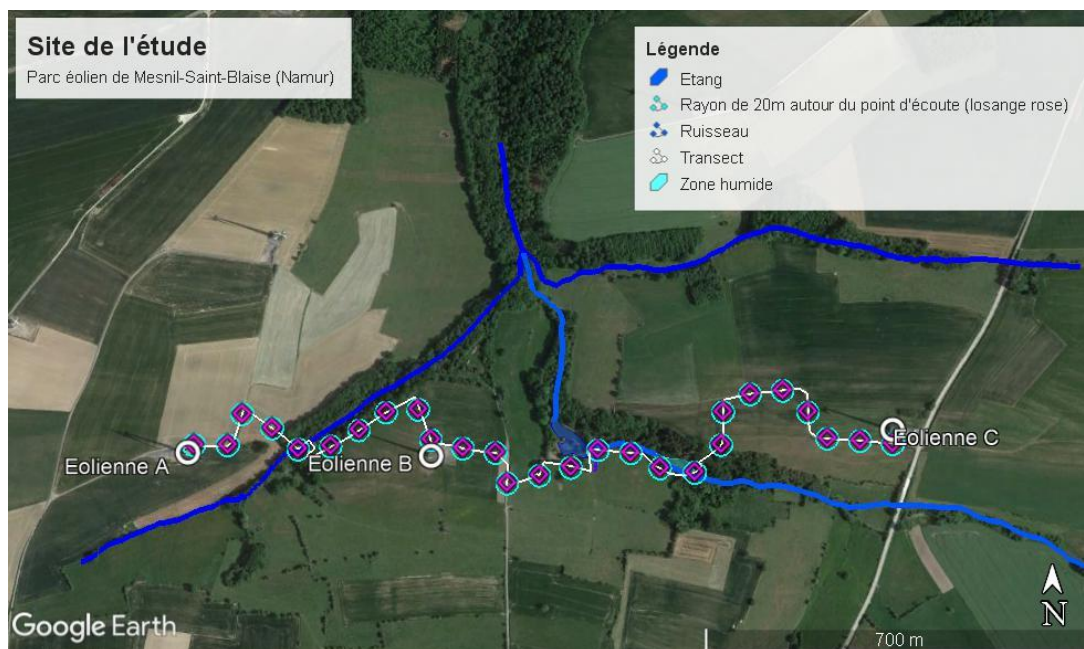


Figure 5 : Représentation cartographique du site de l'étude.

L'intérêt de ce site s'inscrit également dans un contexte plus large. En effet, dans un rayon de 10 km autour de la zone d'étude, des sites de grand intérêt biologique (SGIB) ainsi que des gîtes souterrains ou dans des bâtiments sont répertoriés (Annexe II). Les différents statuts de protection dont bénéficient ces sites préservent notamment un maillage écologique autour de la zone d'étude. Le rayon d'action de la plupart des chauves-souris allant de 5 km (pour la plupart des espèces) à 10 km (pour les Sérotines, Noctules et Murins), le site d'étude semble propice à leur présence (Arthur & Lemaire, 2015).

Design expérimental

La récolte de données a commencé le 16 mars et s'est terminée le 18 juin, basée sur un intervalle temporel de 4 jours en moyenne, pour un total de 25 soirées d'échantillonnage, chacune composée de 27 enregistrements⁷. Les dates de récolte de données ont été adaptées sur base du programme initial (tous les 4 jours) en fonction des conditions météorologiques, et ces modifications n'ont jamais dépassé un jour (avant ou après) pour respecter au mieux le programme. Les conditions météorologiques jugées favorables pour les sorties de terrain étaient basées sur l'absence (ou le minimum) de précipitations à cause de la sensibilité du matériel à l'humidité, puis sur les températures plus élevées et finalement sur des vitesses de vent modérées (< 6 m/s).

Sur le transect passant par les éoliennes A, B et C, 27 points d'écoute sont répartis et distancés les uns des autres de 60 m (à vol d'oiseau) en moyenne⁸ (Figure 5). Autour de chaque point d'écoute, un rayon de 20 m est cartographié et considéré dans l'étude de sorte qu'un maximum de la surface du transect soit recouverte. C'est au sein de ces rayons que les différents micro-habitats ont été répertoriés. La limite des 20 m de rayon a également été choisie pour respecter les limites de capacités d'enregistrement du détecteur⁹ et la possibilité de détecter les chauves-souris à une certaine distance. En effet, certaines espèces ne sont détectables qu'à environ 5 m de distance (Oreillard et Rhinolophes), la plupart le sont à 10-40 m, alors que d'autres peuvent l'être à 100 m de distance (Noctules) (Barataud, 2015).

Au cours des différentes sorties de terrain, le transect fut parcouru dans le sens Est-Ouest et Ouest-Est de façon alternée. Ceci dans le but d'uniformiser spatiotemporellement les enregistrements de chauves-souris.

Sur une même sortie de terrain, le transect était parcouru dans un sens et puis dans l'autre ;

De jour, marcher de l'éolienne A vers C par exemple pour la récolte des données environnementales, dans le but de bénéficier d'une luminosité suffisante.

De nuit, parcourir le transect dans l'autre sens (de l'éolienne C vers A) pour enregistrer les chauves-souris et récolter les données météorologiques associées.

⁷ Ce nombre d'enregistrements (un enregistrement par point d'écoute) est parfois variable en fonction des aléas vécus sur le terrain. Ceci sera discuté dans la section Discussion.

⁸ Certaines de ces distances ont dû être adaptées pour la praticabilité sur le terrain mais n'excèdent jamais 70 m.

⁹ Communication personnelle de Yves Laurent.

Le transect de jour était parcouru en 1 heure maximum et, pour le transect de nuit, il fallait compter 2h12 exactement (voir la section “Enregistrements acoustiques”). Une sortie de terrain durait donc un peu plus de 3h en ne comptant pas les trajets pour arriver au site et le quitter (environ 6 heures au total).

Durant les deux trajets sur le transect, tout le matériel nécessaire était emporté (Figure 6). C’est pour cette raison, ainsi que pour ma sécurité, que j’ai toujours été accompagnée de minimum deux personnes (rarement trois et ce, maximum). Ceci s’est organisé en prenant contact notamment avec les étudiants de première année de Master en Biologie de Organismes et Écologie à l’Université de Liège et d’autres volontaires de tout horizon.

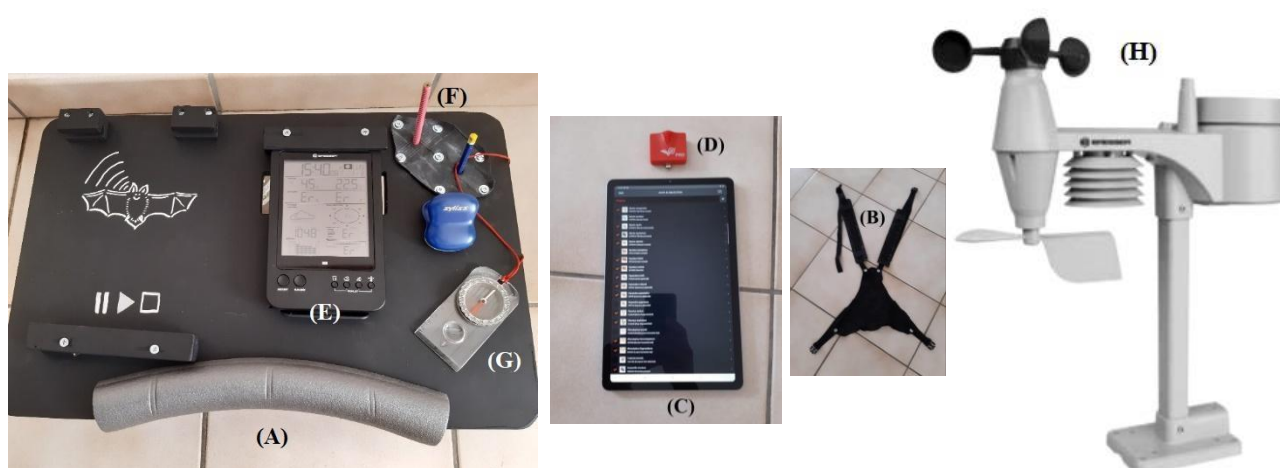


Figure 6 : Matériel emporté. Support noir (A) créé par Yves Laurent qui, attaché par un harnais au niveau du dos (B), permet de porter une tablette (Samsung Galaxy Tab S6 Light) (C) sur laquelle vient se brancher le micro¹⁰ (D), la station météo (E) et le stylet de la tablette (F). Sont également nécessaires une boussole (G) et le mât météo¹¹ (H).

Données environnementales

Avant la première date de récolte de données, le site fut prospecté (21 février 2021) afin d’inventorier tous les micro-habitats présents dans les rayons de 20 m autour des points d’écoute. L’inventaire fut rédigé sous forme de tableau pour distinguer les paramètres qui sont fixes (présence d’un sentier, d’une haie simple ou double, ...) de ceux qui sont variables (présence de flaques d’eau, stades des cultures, floraison des haies, ...) (Annexe IIIa). Ceci permettait alors de ne récolter que les données environnementales variables et de procéder comme suit sur le terrain ; pendant le parcours du transect de jour, enregistrer une note vocale

¹⁰ Le micro est l’enregistreur actif portable EchoMeter Touch 2 Pro (Wildlife acoustics, Maynard, USA).

¹¹ Toutes les informations techniques du mât météo et de sa station sur : www.bresser.de/download/7002520.

(sur l'application par défaut de la tablette) en arrivant à chaque point d'écoute pour faire l'état des lieux depuis la dernière date de sortie de terrain. Le lendemain de chaque sortie de terrain, ces notes vocales étaient retranscrites dans le tableau de données brut.

Enregistrements acoustiques

La période d'activité des chauves-souris démarrant un peu après le coucher du soleil (Arthur & Lemaire, 2015), le début des enregistrements fut fixé à la minute exacte du crépuscule civil¹² de chaque date concernée.

A chaque point d'écoute, les ultrasons émis dans l'environnement étaient enregistrés par le micro de façon continue pendant 2 minutes. Celui-ci était branché à la tablette sur laquelle est téléchargée l'application liée à l'enregistreur (EchoMeter Touch). Celle-ci permet d'entendre et de voir les différents ultrasons émis en temps réel grâce au système hétérodyne. L'application était paramétrée comme suit : les fichiers "Noise" et l'auto-identification en temps réel (dont la sensibilité est fixée à "Moyenne") sont activés.

L'auto-identification est un outil qui permet d'avoir une première identification, parfois jusqu'à l'espèce, des chauves-souris détectées. Étant donné que ces identifications sont basées sur des algorithmes et proposées par le logiciel, il était primordial qu'un ou des expert(s) analyse(nt) les bandes sons pour corriger ces identifications. Pour chaque enregistrement de 2 minutes, le logiciel va alors nommer le fichier en fonction de l'auto-identification, de la date et de l'heure de l'enregistrement. Si aucune chauve-souris n'a été détectée dans l'enregistrement, il s'agira d'un fichier "Noise". Si une chauve-souris est détectée mais que le logiciel n'a pas pu proposer d'identification, le fichier sera nommé "NoID". Dans le dernier cas, si le logiciel a une identification à proposer, le nom de l'espèce sera inclus dans le nom du fichier audio.

Après les 2 minutes d'enregistrement, il fallait arriver au point suivant en 3 minutes afin de respecter la période d'activité des chauves-souris (la fenêtre d'activité dure entre 1h30 et 2h après le coucher du soleil (Appel *et al.*, 2017), tout en ayant le temps de parcourir le transect en entier. Avant chaque date de terrain, il a donc fallu calculer le *timing* entre les différents points (Annexe IIIb).

¹² Le crépuscule civil correspond au moment où le centre du Soleil est situé à $\leq 6^\circ$ sous l'horizon (Futura Sciences, 2020).

Sur une sortie de terrain, 54 minutes de bandes sons furent enregistrées (2 minutes * 27 points d'enregistrement). En comptabilisant les 25 sorties de terrain, un total de 1350 minutes d'enregistrements (54 minutes par sortie * 25 sorties), soit 22h30, étaient attendues.

Données météorologiques

Les données récoltées étaient, d'une part, la température (°C), la vitesse du vent (m/s), l'orientation du vent (points cardinaux), le taux d'humidité (%) et la pression atmosphérique (hPa). Celles-ci ont été mesurées par le mât météo et envoyées par ondes radio vers la station météorologique. D'autre part, la pluie (présence/absence) et la couverture nuageuse (ciel dégagé/étoilé, ciel éclairci, ciel couvert) étaient surveillées au fil de la soirée et encodées dans la fiche météo (Annexe IIIc).

A chaque point d'enregistrement, le mât météo devait être orienté précisément au nord à l'aide d'une boussole et maintenu à la verticale (présence de nivelles) pendant les deux minutes d'enregistrement. A la fin des deux minutes, une photo des résultats météorologiques sur la station météo était prise à l'aide d'un téléphone.

Informations supplémentaires

Entre chaque point d'écoute, qu'il s'agisse du transect de jour ou de nuit, des informations supplémentaires ont été encodées afin d'enrichir la discussion. Elles étaient enregistrées vocalement lorsqu'il s'agissait d'observations particulières, d'un problème technique lié au matériel ou au transect, ... Ces informations supplémentaires comprenaient également des enregistrements continus (3 minutes) entre chaque point.

Analyse des enregistrements - Traitement & Identifications

Kaleidoscope Pro V. 5.1.9 (Wildlife Acoustics, Maynard, USA)

Toutes les bandes sons (fichiers *.wav) et leurs métadonnées (fichiers *.csv) sont stockées dans l'application Echometer Touch. Les bandes sons ont été importées de la tablette vers un ordinateur possédant le logiciel Kaleidoscope afin d'en extraire les métadonnées telles que des identifiants pour chaque bande son, les coordonnées GPS, la date et l'heure de l'enregistrement et les auto-identifications proposées, parmi d'autres.

Ensuite, chaque bande son était triée selon l'heure d'enregistrement par ordre croissant afin de faciliter l'encodage dans la base de données brute. En même temps, les bandes sons "bonus" (enregistrements acoustiques entre les points d'écoute) étaient encodées dans une base de données séparée car elles n'ont pas fait partie des données à analyser statistiquement.

Les paramètres choisis pour l'extraction des fichiers *.csv dans le cadre de cette étude sont fixés et présentés en détails en Annexe IVa ; les fichiers "Noise" étaient volontairement sélectionnés pour pouvoir faire une vérification de l'absence de chauves-souris selon l'auto-identification. L'intervalle de fréquences minimum et maximum détectées comme étant un signal était fixé à 10 kHz - 120 kHz. La durée minimale et maximale de chaque impulsion détectée comme étant un signal était fixée entre 2 ms et 500 ms. Finalement, il est aussi possible de sélectionner les espèces que le logiciel doit considérer pour l'auto-identification. Dans le cas de cette étude réalisée en Belgique, il était pertinent de sélectionner toutes les espèces belges ainsi que quelques espèces exogènes mais parfois rencontrées en Belgique (la Pipistrelle de Kuhl, *Pipistrellus kuhlii*, notamment).

BatSound V. 1.3.1 (Pettersson Elektronik, Uppsala, Suède)

Le logiciel Batsound permet d'importer les bandes sons (*.wav) afin de visualiser et d'analyser les sonogrammes. Ces derniers représentent tous les sons détectés et enregistrés allant de 0 kHz à 128 000 kHz (paramètres par défaut) en fonction du temps (ms). La durée d'un cri (ms), le pic d'intensité (dB), la fréquence maximum émise (kHz) lors d'un cri ou lors d'une série de cris et l'intervalle de temps entre deux cris (ms) ont été mesurés. Ces mesures permettent l'identification des chauves-souris et la séquence ainsi que la forme des cris permettent la détermination des comportements. Il est également possible de visualiser les sons via un *spectre de puissance*¹³ (intensité en fonction de la fréquence) et un oscillogramme (amplitude en fonction du temps) selon l'information recherchée (Annexe IVb). Dans le cas de cette étude, l'analyse était premièrement basée sur le sonogramme et le *spectre de puissance*. L'oscillogramme n'a été utilisé que dans certains cas d'identifications compliquées.

Il est possible de paramétrer certains modules du logiciel dans le but d'affiner et de vérifier certaines analyses (Annexe IVc). Par exemple, le zoom (nombre de millisecondes par fenêtre), la palette de couleurs utilisée pour représenter l'intensité (dB), l'amplitude du contraste (allant

¹³ Littéralement traduit de l'anglais : *power spectrum*.

de faible à élevée), ... Dans ce cas-ci, chaque bande son fut analysée sous les mêmes paramètres et conditions ; analyse seconde par seconde, avec une amplitude de contraste relativement faible (niveau 4) et la palette choisie fut Jaune, Rouge & Bleu.

Traitement de la base de données et analyses

Traitement de la base de données

Une fois la base de données complétée par tous les paramètres environnementaux et météorologiques, et toutes les identifications, il fut obligatoire d'adapter le tableau pour l'importation dans le logiciel RStudio Desktop V.1.4 (Boston, USA) utilisé pour toutes les analyses. Certaines variables furent regroupées (Tableau 2), d'autres retirées car présentes qu'une seule fois par exemple.

Tableau 2 : Traitement de la base de données en vue de la préparer aux analyses.

Catégories	Variables initiales	Variable finale
Comportements	Passage + Recherche	passage
	Chasse + Capture	chasse
Voies de circulation	Chemin + relief plat	chemin.plat
Eolienne	Éolienne + Mât + Parking	eolienne
Cultures	Graminées stade feuilles + stade tige	gr.feilles.tige
	Fourragère stade fleurs + stade fauchée	fou.fleurs
	Colza stade feuilles + stade tige + stade graines	col.feilles.tige.graines
Haies	Haie simple + haie mixte	haie.simple.mixte
Arbres	Bosquet + essences mixtes	bosquet

La version finale du tableau de données se compose de 763 lignes et 42 colonnes (Annexe Va). Chaque ligne représente un enregistrement et est dupliquée si plusieurs espèces de chauves-souris ont été détectées sur une même bande son. Chaque colonne représente une variable. Dans une première partie, les variables associées aux chauves-souris : les identifications de l'espèce, du groupe d'espèces et les comportements. Ensuite, les variables qui représentent les

métadonnées¹⁴ des enregistrements dont la date et l'heure de l'enregistrement, et l'habitat (HAB) auquel l'enregistrement a été fait. L'ensemble de variables suivant concerne les données météorologiques récoltées et, finalement, les dernières variables sont relatives aux éléments environnementaux (les micro-habitats).

Analyse exploratoire

Afin d'avoir une vision globale du jeu de données, le **nombre de contacts total** enregistrés ainsi que le **nombre de contacts par espèces** ont été calculés sur Microsoft Excel (Version 2019). Il a été décidé, dans le cadre de cette étude, de considérer qu'il y avait deux individus de la même espèce par bande lorsqu'il était aisé d'en distinguer plus d'un.

De plus, des **graphiques en barres** ont été générés sur R pour visualiser la distribution des individus de chaque espèce (et les groupes d'espèces) sur le transect, ainsi que leur répartition dans le temps. Des **graphiques en camembert** ont été réalisés sur Excel pour mettre en évidence la proportion de chaque élément de l'environnement (micro-habitats) dans le rayon considéré pour un point d'enregistrement (HAB).

Analyses statistiques

Dans un premier temps, des **matrices de corrélation** ont été utilisées afin de calculer les corrélations entre les variables catégorielles entre elles avec le test V de Cramer, les variables continues entre elles avec le test de corrélation de Spearman, et les variables catégorielles avec les variables continues avec une ANOVA. Ces matrices ont été utilisées afin de sélectionner les variables explicatives à incorporer dans les **modèles de régressions linéaires** (*Generalized Linear Model*, ou GLM). Lorsque des variables explicatives étaient corrélées entre elles avec un seuil > 0.5 , l'une d'entre elles a été exclue du modèle final. Les GLM ont été appliqués, sur le logiciel R, dans le but de mettre en évidence les variables qui expliquent le mieux la variance dans le nombre de contacts et dans le comportement de chasse des chauves-souris. Pour tous les tests réalisés, la variable réponse testée est de type binaire donc la famille utilisée pour l'application du modèle est la **régression logistique**.

N'ayant pas assez de données pour appliquer les modèles au niveau des espèces, seules les analyses sur les groupes ont été faites, à l'exception des Pipistrelles communes et des Sérotines

¹⁴ Les métadonnées conservées mais non traitées incluent l'heure du crépuscule civil pour chaque date, le temps écoulé entre l'heure du crépuscule civil (correspondant au début des enregistrements) et l'enregistrement, ...

communes qui comptabilisent chacune 196 et 34 contacts respectivement. Parmi les groupes testés¹⁵, seuls sont gardés PIPGR, MYOGR et SÉROTULES car le groupe rassemblant les deux données de Rhinolophes (RHINO) est trop faible pour le tester statistiquement.

Influence des paramètres météorologiques (Q1 - Q2)

Les tests de corrélations ont mis en évidence certaines corrélations entre variables explicatives liées aux paramètres météorologiques. Le couvert nuageux et la direction du vent étaient des variables corrélées ($> 0,5$) avec la majorité des autres variables. Elles n'ont donc pas été testées conjointement avec les autres dans le GLM.

Q1 : Les paramètres météorologiques influencent-ils la présence de chauves-souris ?

Afin de répondre à cette première question, la variable réponse testée était le *passage* (variable binaire). En effet, cette variable inclut tous les contacts de chauves-souris (toutes espèces confondues). Dans ce cas, la régression logistique est appliquée sur l'ensemble des données ("data"). Les paramètres météorologiques testés furent la température (°C), la vitesse du vent (m/s), l'humidité relative (%), la pression atmosphérique (hPa) et la présence ou l'absence de pluie. Ce premier modèle peut être représenté comme ceci :

Modèle 1a	données = data	<i>Passage</i> ~ température + vitesse du vent + humidité + pression atmosphérique + pluie, family = binomial
-----------	----------------	---

Des régressions logistiques supplémentaires ont été appliquées afin de mettre en évidence si les groupes d'espèces enregistrés répondaient différemment à ces mêmes variables météorologiques. Pour ce faire, une nouvelle variable par groupe d'espèces fut créée dans le jeu de données pour ne sélectionner que la présence du groupe testé (= 1). Les données de présence des autres groupes sont considérées comme des absences (= 0). Ceci permet alors de tester la présence d'un groupe (variable binaire) par rapport à toutes les autres données (jeu de données complet = data). Ces régressions logistiques peuvent être modélisées comme suit:

Modèle 1b	données = data	<i>Groupe d'espèces</i> ~ température + vitesse du vent + humidité + pression atmosphérique + pluie, family = binomial
-----------	----------------	--

¹⁵ Il fut considéré acceptable de faire les analyses statistiques sur ces groupes (créés sur base de caractéristiques acoustiques communes) car dans les données, le groupe MYOGR n'inclut que des Murins, et le groupe des Sérotules est sur-représenté par une seule espèce (EPTSER), d'autant plus qu'elle partage des caractéristiques écologiques communes avec NYCNO (n = 5).

La même manipulation fut réalisée pour tester l'influence des paramètres météorologiques sur la présence de Pipistrelles communes et de Sérotines communes :

Modèle 1c	données = data	<i>Espèce</i> ~ température + vitesse du vent + humidité + pression atmosphérique + pluie, family = binomial
-----------	----------------	--

Q2: Les paramètres météorologiques influencent-ils le comportement de chasse des chauves-souris ?

Le comportement des chauves-souris testé est la chasse. La régression logistique est appliquée sur l'ensemble des données ("data") pour inclure toutes les espèces. La variable réponse testée (*chasse*) est également de type binaire et les variables explicatives (paramètres météorologiques) sont identiques à la Question 1. Cette régression logistique peut être représentée comme ceci :

Modèle 2	données = data	<i>Chasse</i> ~ température + vitesse du vent + humidité + pression atmosphérique + pluie, family = binomial
----------	----------------	--

Influence des paramètres environnementaux (Q3 - Q10)

Plusieurs modèles linéaires généralisés ont été appliqués pour tester l'influence des paramètres environnementaux sur la présence et le comportement de chasse des chauves-souris.

Premièrement, les hypothèses concernant une potentielle **influence du stade fleuri de différentes variables sur la présence de chauves-souris** ont été testées. Pour chacune de ces hypothèses, la variable réponse testée est le *passage* (variable binaire) afin d'inclure tous les contacts de chauves-souris dans l'analyse.

Q3: La floraison des haies a-t-elle une influence sur la présence de chauves-souris ?

Pour répondre à cette question, il a fallu appliquer un filtre sur la variable *haie.simple.mixte* afin de ne garder que les données pour lesquelles une haie était présente. Ceci a créé un subset de données "data.haies" (n = 322, avec présence de chauves-souris n = 102). Le GLM fut donc appliqué sur ce jeu de données pour tester l'influence de la floraison des haies (n = 238) sur la présence de chauves-souris par rapport aux haies non fleuries (n = 94). Le modèle de cette régression logistique peut être représenté comme suit :

Modèle 3	data = data.haies	<i>Passage</i> ~ haie.floraison, family = binomial
----------	-------------------	--

Q4: La floraison des accotements a-t-elle une influence sur la présence de chauves-souris?

Une nouvelle variable a dû être créée dans le jeu de données “data” afin de tester la floraison de l’accotement (=1) (n = 62) sur les chauves-souris par rapport à l’accotement herbeux (=0) (n = 204), ce qui en fait une variable binaire (*accotement*). Ensuite, un filtre a été appliqué sur le jeu de données complet “data” afin de ne sélectionner que les données pour lesquelles il y avait un accotement, qu’il soit herbeux ou fleuri. Ceci a permis de créer un subset de données “data_accotement” (n = 266, avec présence de chauves-souris n = 28), sur lequel la régression logistique est appliquée. Cette dernière peut être annotée comme ceci :

Modèle 4	données = data_accotement	<i>Passage</i> ~ accotement, family = binomial
----------	---------------------------	--

Q5: Le stade épis des cultures de graminées a-t-il une influence sur la présence de chauves-souris ?

La même méthode que pour répondre à Q4 fut utilisée ici. La nouvelle variable binaire *graminees* contient les données pour lesquelles les graminées sont au stade épis (=1) (n = 54) et aux stades feuilles et tige (=0) (n = 167). L’application d’un filtre sur l’ensemble du jeu de données “data” pour ne garder que les données pour lesquelles il y avait des graminées a permis de créer le subset “data_graminees” (n = 204, avec chauves-souris n = 44) afin d’appliquer le GLM sur ce dernier. Ci-dessous, la représentation de ce modèle :

Modèle 5	données = data_graminees	<i>Passage</i> ~ graminees, family = binomial
----------	--------------------------	---

Q6: Le stade fleuri des cultures fourragères a-t-il une influence sur la présence de chauves-souris ?

Afin de répondre à cette question, il a également fallu créer une nouvelle variable *fourrage* pour laquelle les valeurs = 1 représentent le stade fleuri de la culture fourragère (n = 8) et les valeurs = 0 contiennent les données pour lesquelles la culture fourragère était au stade non fleuri (n = 60). L’application d’un filtre sur “data” pour ne garder que les données pour lesquelles une culture fourragère était présente a permis de créer le subset de données “data_fourrage” (n = 68, avec chauves-souris n = 35) sur lequel a été appliqué la régression logistique, représentée comme ceci :

Modèle 6	données = data_fourrage	<i>Passage</i> ~ fourrage, family = binomial
----------	-------------------------	--

Q7: Le stade fleuri des cultures de colza a-t-il une influence sur la présence de chauves-souris ?

La même manipulation fut appliquée pour les cultures de colza. La nouvelle variable *colza* vaut 1 lorsque la culture était au stade fleurs (n = 153), tandis qu'elle vaut 0 lorsque celle-ci était aux stades feuilles, tige et graines (n = 123). La filtre a permis d'isoler les données contenant la présence d'une culture de colza ("data_colza", n = 218, avec chauves-souris n = 31) pour y appliquer le GLM décrit ci-dessous :

Modèle 7	données = data_colza	<i>Passage</i> ~ colza, family = binomial
----------	----------------------	---

Ensuite, les modèles appliqués étaient plus généraux pour tester l'éventuelle **influence de facteurs environnementaux sur la présence et le comportement de chasse des chauves-souris**. Les variables explicatives sélectionnées pour les régressions logistiques sont celles qui ne sont pas corrélées ($> 0,5$) avec d'autres variables. Les variables non retenues pour l'application du modèle linéaire généralisé sont les zones humides, les haies fleuries et les chemins car elles sont corrélées avec d'autres variables explicatives. Parmi les variables finales incluses dans le modèles, celles qui étaient des catégories d'un ensemble plus large ont été regroupées en une seule variable (Tableau 3).

Tableau 3 : Regroupement de variables incluses dans la régression logistique (Q9 et Q10) (Annexe Vb).

Variables initiales	Variables regroupées
Accotement herbeux + accotement fleuri	Accotement
Graminées stade feuilles/tige + graminées stade épis	Graminées
Culture fourragère stade feuilles + stade fleurs	Fourrage
Culture de colza stade feuilles/tige/graines + stade fleurs	Colza

Ces regroupements permettent de limiter le nombre de variables à tester dans les modèles pour répondre aux questions suivantes.

Q8: Quels paramètres environnementaux influencent la présence de chauves-souris ?

Afin de répondre à cette neuvième question, la variable réponse testée était, comme pour le test sur les paramètres météorologiques, le *passage* (variable binaire), qui inclut toutes les chauves-souris enregistrées (toutes espèces confondues). Les variables environnementales testées furent la présence d'un accotement, d'une éolienne, de cultures de graminées, de colza et fourragère, ainsi que la présence d'une prairie permanente extensive et de fauche, de haies, d'un arbre isolé, d'un bosquet, d'un ruisseau, et d'un étang. Dans ce cas, la régression logistique est appliquée sur l'ensemble des données ("data") et peut être modélisée comme ceci :

Modèle 8a	données = data	<i>Passage</i> ~ accotement + eolienne + graminees + fourrage + colza + prairie permanente extensive + prairie de fauche + haie + arbre isolé + bosquet + ruisseau + étang, family = binomial
-----------	----------------	---

Ensuite, pour tester l'éventuelle distinction entre les groupes d'espèces (et espèces), les nouvelles variables créées pour la Question 1 ont été réutilisées, et les régressions logistiques ont également été appliquées sur l'ensemble du jeu de données "data". Les modèles des régressions logistiques s'écrivent comme suit :

Modèle 8b	données = data	<i>Groupe d'espèces</i> ~ accotement + eolienne + graminees + fourrage + colza + prairie permanente extensive + prairie de fauche + haie + arbre isolé + bosquet + ruisseau + étang, family = binomial
-----------	----------------	--

Modèle 8c	données = data	<i>Espèce</i> ~ accotement + eolienne + graminees + fourrage + colza + prairie permanente extensive + prairie de fauche + haie + arbre isolé + bosquet + ruisseau + étang, family = binomial
-----------	----------------	--

Q9: Quels paramètres environnementaux influencent le comportement de chasse des chauves-souris ?

Tout comme pour le test des paramètres météorologiques, le comportement des chauves-souris testé est la *chasse* (variable binaire). Toutes les espèces confondues sont testées donc le modèle s'applique sur l'ensemble du jeu de données ("data") :

Modèle 9	données = data	<i>Chasse</i> ~ accotement + eolienne + graminees + fourrage + colza + prairie permanente extensive + prairie de fauche + haie + arbre isolé + bosquet + ruisseau + étang, family = binomial
----------	----------------	--

Finalement, un modèle linéaire généralisé a été appliqué afin de mettre en évidence un potentiel effet de la **présence d'éoliennes sur la fréquentation du parc éolien par les chauves-souris**.

Q10: La présence d'éolienne influence-t-elle la présence de chauves-souris sur le site de l'étude ?

Pour répondre à cette question, la variable réponse testée est également le *passage* pour inclure tous les contacts de chauves-souris, et la variable explicative est la présence ou l'absence d'une éolienne. La régression logistique appliquée sur l'ensemble du jeu de données "data" peut être représentée comme suit :

Modèle 10	données = data	<i>Passage</i> ~ eolienne, family = binomial
-----------	----------------	--

Résultats

Analyse exploratoire

Exploration de l'échantillon

Le Tableau 4 présente les résultats de l'analyse exploratoire. Au total, un peu plus d'un tiers (37 %) des enregistrements contenaient au moins une chauve-souris. Sur les 10 espèces enregistrées, le groupe des Pipistrelles (PIPGR) est largement représenté avec 72 % de l'échantillon total contenant des chauves-souris (n = 280). Le reste de l'échantillon est principalement composé du groupe MYOGR composé de tous les Murins (*Myotis sp.*) et Oreillards (*Plecotus sp.*), et du groupe des SÉROTULES, formé par les Sérotines (*Eptesicus serotinus* et *Vespertilio murinus*) et les Noctules (*Nyctalus sp.*). Après les Pipistrelles communes (76 %), ce sont les Sérotines communes qui représentent la plus grande part de l'échantillon contenant des chauves-souris identifiées jusqu'à l'espèce (n = 259) avec 34 individus soit 13 %. L'écart entre la proportion de Pipistrelles communes et des autres espèces est important. Cette espèce est sur-représentée dans l'échantillon.

Tableau 4 : Synthèse de l'analyse exploratoire de l'échantillon.

Taille de l'échantillon total (nombre d'enregistrements)		763	100 %
Chauves souris enregistrées (nombre de contacts)		280	37 %
Chauves-souris non identifiées jusqu'à l'espèce		21	
Enregistrements sans chauve-souris		483	63 %
Analyse par espèces		259	100 %
Nombre d'espèces différentes enregistrées		10	
PIPGR n = 202 (~ 72 %)	<i>Pipistrellus pipistrellus</i> (pipistrelle commune) [PIPPIP]	196	76 %
	<i>Pipistrellus pygmaeus</i> (pipistrelle pygmée) [PIPPYG]	1	< 1 %
	<i>Pipistrellus nathusii</i> (pipistrelle de Nathusius) [PIP NAT]	1	< 1 %
SEROTULES n = 46 (~ 16 %)	<i>Eptesicus serotinus</i> (sérotine commune) [EPTSER]	34	13 %
	<i>Nyctalus noctula</i> (noctule commune) [NYCNOC]	5	2 %
MYOGR n = 30 (~ 11 %)	<i>Myotis nattereri</i> (murin de Natterer) [MYONAT]	7	3 %
	<i>Myotis daubentonii</i> (murin de Daubenton) [MYODAU]	6	2 %
	<i>Myotis emarginatus</i> (murin émarginé) [MYOEMA]	6	2 %
	<i>Myotis myotis</i> (grand murin) [MYOMYO]	1	< 1 %
RHINO n = 2 (< 1 %)	<i>Rhinolophus ferrumequinum</i> (grand rhinolophe) [RHIFER]	2	< 1 %

Les espèces rares dans l'échantillon, dont le grand Murin et le grand Rhinolophe, méritent d'être mentionnées car sont, pour certaines, des espèces sensibles. En effet, en Wallonie, *M. myotis* est classé "vulnérable ou en régression" et *R. ferrumequinum* est considéré comme "rare ou en forte régression". Ils bénéficient tous les deux non seulement du statut de protection stricte comme toutes les espèces belges, mais aussi de zones spéciales de conservation

(respectivement Annexes IV et II des Directives Habitats Faune-Flore) (Arthur & Lemaire, 2015).

Distribution temporelle des espèces sur la période de récolte des données

La récolte des données ayant commencé le 16 mars et s'étant terminée le 18 juin, l'échantillon total représente presque trois mois.

Sur toute la période de récolte de données, les conditions météorologiques étaient relativement "mauvaises". En effet, il a fait particulièrement venteux, humide, et les précipitations étaient relativement fréquentes. Ces conditions sont traduites par de faibles valeurs de pression atmosphérique durant toute la saison de terrain¹⁶ (Météo Contact, 2015 - 2021).

Lors des deux premières dates de terrain (16/03 et 19/03), aucune chauve-souris n'a été détectée (Figure 7). Ce fut également le cas les 9 et 13 avril. Globalement, c'est à partir de fin mai que le nombre de contacts augmente.

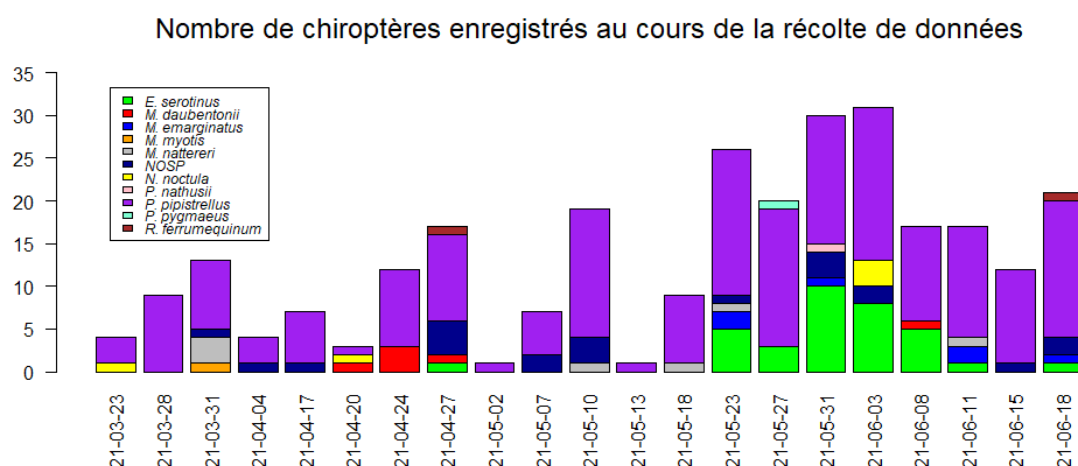


Figure 7 : Distribution temporelle (aa-mm-jj) des chiroptères enregistrés pendant la récolte de données. Les dates pour lesquelles il n'y a eu aucun contact de chauve-souris n'apparaissent pas sur cette figure (16/03, 19/03, 09/04, 13/04). NOSP : présence d'un individu qui n'a pas pu être identifié jusqu'à l'espèce¹⁷.

Du point de vue des espèces rencontrées, les Pipistrelles communes (*P. pipistrellus*) sont les plus fréquemment enregistrées et sont présentes à chaque sortie de terrain (sauf les quatre dates sans chauve-souris). Ensuite, les Sérotines communes (*Eptesicus serotinus*) occupent la deuxième place. Ces dernières semblent plus présentes à partir du 23 mai. Il s'avère que les

¹⁶ Les valeurs de pression atmosphérique sont décrites dans le tableau 12.

¹⁷ Les "NOSP" ont volontairement été inclus dans cette figure pour présenter la quantité de chauves-souris détectées réelle, malgré que ces individus n'aient été identifiés jusqu'à l'espèce. Pour une raison de simplification de la figure, les groupes auxquels appartiennent ces individus ne sont pas mentionnés.

autres espèces ont été enregistrées de manière plus uniforme sur la saison de récolte des données.

Distribution spatiale des espèces enregistrées sur le transect

Sur les 27 points d'enregistrement, la composition en micro-habitats de chaque zone de 20 m (HAB) est très variable (Annexe VI). La distribution spatiale des chauves-souris enregistrées semble suivre un pattern particulier.

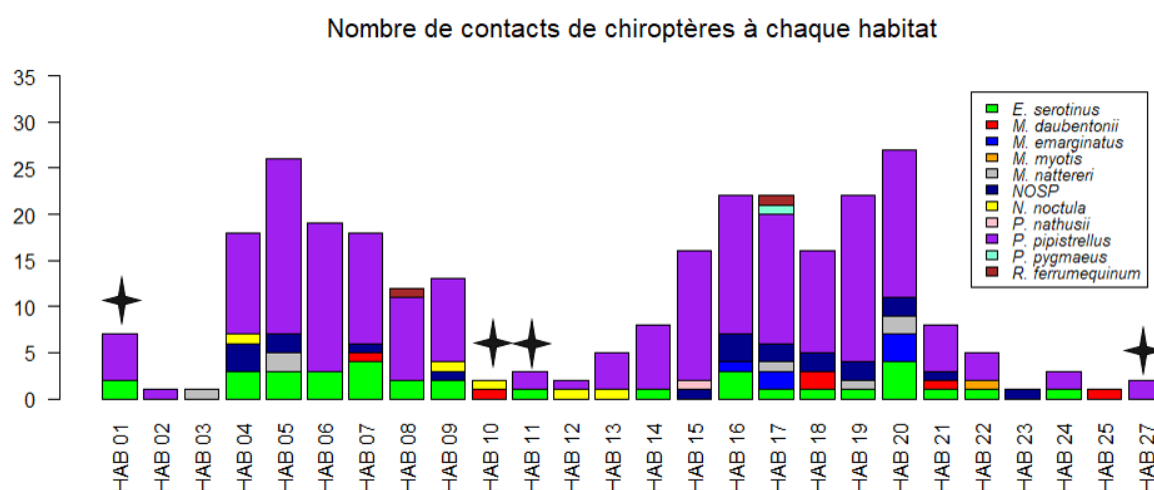


Figure 8 : Répartition spatiale (HAB) des chiroptères enregistrés. Le seul point d'écoute pour lequel il n'y a jamais eu de chauves-souris est l'habitat 26 qui n'est pas représenté sur ce graphique. NOSP : présence d'un individu qui n'a pas pu être identifié jusqu'à l'espèce. Les étoiles noires représentent la présence d'une éolienne à l'habitat.

En effet, la figure 8 met en évidence la quantité plus importante de chauves-souris détectées aux habitats 4 à 9 d'une part, et aux habitats 15 à 20 d'autre part. A l'inverse, les chauves-souris n'ont pas ou peu fréquenté les habitats 1 à 3, 10 à 14 et 21 à 27. De plus, sur les 25 sorties de terrain, aucune chauve-souris n'a jamais été enregistrée à l'habitat 26. Les habitats 05 et 20, au contraire, sont les plus fréquentés par les chauves-souris en termes de nombre de contacts. Cette fréquentation est également variée en termes d'espèces rencontrées (4 à 5 espèces différentes).

Analyses statistiques

Influence des paramètres météorologiques (Q1 - Q2)

Q1 : Les paramètres météorologiques influencent-ils la présence de chauves-souris ?

Modèle 1a	<i>Passage</i> ~ température + vitesse du vent + humidité + pression atmosphérique + pluie, famille = binomial
-----------	--

Les variables qui ont montré un effet significatif (p -valeur $< 0,05$) sur la présence de chauves-souris sont la température, la vitesse du vent et la pression atmosphérique (Tableau 5). La température aurait une influence positive sur la présence de chauves-souris. Autrement dit, les températures plus élevées seraient favorables à leur présence. À l'inverse, la vitesse du vent et la pression atmosphérique semblent avoir un effet négatif sur le nombre de chauves-souris enregistrées.

Tableau 5 : Synthèse des résultats significatifs du modèle 1a.

Variable réponse	Variable explicative	p-valeur	coefficient
Passage	Température	2,28e-11 (***)	0,12
	Vitesse du vent	7,49e-05 (***)	- 0,65
	Pression atmosphérique	0,027 (*)	-0,04

Au niveau des groupes d'espèces, les variables météorologiques ayant un effet significatif sont les mêmes : température, vitesse du vent et pression atmosphérique (Tableau 6).

Modèles 1b - 1c	<i>Espèce ou groupe d'espèces</i> ~ température + vitesse du vent + humidité + pression atmosphérique + pluie, famille = binomial
-----------------	---

Les résultats statistiques ont montré une influence significative positive de la température sur la présence de Pipistrelles (PIPGR) et de Sérotules. Autrement dit, cela signifie que lorsque les températures étaient plus élevées, plus de Pipistrelles et de Sérotules ont été enregistrées. La vitesse du vent, en revanche, a montré un résultat significatif mais négatif pour les deux mêmes groupes. Lorsque la vitesse du vent est élevée, moins de Pipistrelles et de Sérotules ont été

détectées. Concernant le groupe des Murins et des Oreillards (MYOGR), c'est la pression atmosphérique qui semble avoir un effet significatif sur leur présence. Lorsque la pression atmosphérique est élevée, le nombre de contacts de ce groupe fut plus faible. L'analyse au **niveau des espèces** pour *Eptesicus serotinus* (EPTSER) et *Pipistrellus pipistrellus* (PIPPIP) montre les mêmes résultats que ceux du niveau des groupes d'espèces.

Tableau 6 : Synthèse des résultats significatifs des modèles 2 et 3.

Variable réponse	Variable explicative	p-valeur	coefficient
PIPGR	Température	1,67e-07 (***)	0,09
	Vitesse du vent	0,0074 (**)	- 0,47
PIPPIP	Température	3,17e-07 (***)	0,09
	Vitesse du vent	0,0075 (**)	- 0,47
MYOGR	Pression atmosphérique	0,0064 (**)	- 0,09
SEROTULES	Température	8,78e-05 (***)	0,13
	Vitesse du vent	0,011 (*)	- 0,99
EPTSER	Température	0,0005 (***)	0,13
	Vitesse du vent	0,035 (*)	- 0,92

Q2: Les paramètres météorologiques influencent-ils le comportement de chasse des chauves-souris ?

le 2	<i>Chasse ~ température + vitesse du vent + humidité + pression atmosphérique + pluie, family</i>
------	---

La régression logistique testant l'influence des paramètres météorologiques sur la chasse des chauves-souris détectées montre des résultats similaires à celle testant la présence de chauves-souris, toutes espèces confondues (Tableau 7). En effet, la température semble avoir un effet très hautement significatif et positif sur le comportement de chasse. La vitesse du vent et la

pression atmosphérique sont les deux variables pour lesquelles un effet significatif, mais négatif, est mis en évidence par l'analyse.

Tableau 7 : Synthèse des résultats significatifs du modèle 2.

Variable réponse	Variable explicative	p-valeur	coefficient
Chasse	Température	0,00028 (***)	0,08
	Vitesse du vent	0,0086 (**)	- 0,56
	Pression atmosphérique	0,016 (*)	- 0,05

Influence des paramètres environnementaux (Q3- Q11)

Q3 - Q7: La floraison de certains éléments de l'habitat influence-t-elle la présence de chauves-souris ?

La floraison des haies semble avoir un effet très hautement significatif et positif sur la présence de chauves-souris, toutes espèces confondues (Tableau 8). Il semble aussi que le stade épis des cultures de graminées a une influence sur la présence de chiroptères. Selon le modèle, il s'agit d'une influence positive donc, autrement dit, lorsque les graminées étaient au stade épis, les contacts avec les chauves-souris furent plus nombreux. La floraison des accotements, de la culture fourragère et des cultures de colza n'ont vraisemblablement pas d'effet significatif sur la présence de chiroptères.

Tableau 8 : Synthèse des résultats des modèles 3 à 7.

Hypothèses (variable réponse = <i>passage</i>)		p-valeur	coefficient
Q3	La floraison des haies a-t-elle une influence sur la présence de chauves-souris ?	0,00038 (***)	1,11
Q4	La floraison des accotements a-t-elle une influence sur la présence de chauves-souris ?	0,49 (NS)	/
Q5	Le stade épis des cultures de graminées a-t-il une influence sur la présence de chauves-souris ?	0,03 (*)	0,87

Q6	Le stade fleuri des cultures fourragères a-t-il une influence sur la présence de chauves-souris ?	0,15 (NS)	/
Q7	Le stade fleuri des cultures de colza a-t-il une influence sur la présence de chauves-souris ?	0,33 (NS)	/

Q8: Les paramètres environnementaux influencent-ils la présence de chauves-souris ?

Modèle 8a	<i>Passage</i> ~ accotement + eolienne + graminees + fourrage + colza + prairie permanente extens prairie de fauche + haie + arbre isolé + bosquet + ruisseau + étang, family = binomial
-----------	---

Sur les trois variables ayant un effet significatif sur la présence de chauves-souris (Tableau 9), seul le ruisseau montre un effet positif. L'accotement et les cultures de graminées semblent influencer négativement la présence de chiroptères.

Tableau 9 : Synthèse des résultats significatifs du modèle 8a.

Variable réponse	Variable explicative	p-valeur	coefficient
Passage	Accotement	1,49e-06 (***)	- 1,66
	Graminées	0,042 (*)	- 1,19
	Ruisseau	0,039 (*)	0,57

Ensuite, selon l'analyse qui distingue les groupes d'espèces (et les espèces *P. pipistrellus* et *E. serotinus*), les Sérotules (dont la Sérotine commune) semblent être le seul groupe qui n'est pas influencé par les éléments de l'environnement testés dans ce modèle (Tableau 10).

8b - 8c	<i>Espèce ou groupe d'espèces</i> ~ accotement + eolienne + graminees + fourrage + colza + prairie perm prairie de fauche + haie + arbre isolé + bosquet + ruisseau + étang, family = binomial
---------	---

Sur toutes les variables explicatives incluses dans le modèle, les variables accotement, graminées, culture fourragère et ruisseau semblent avoir un effet significatif sur les chauves-souris. Cependant, ces variables n'influencent pas les mêmes groupes et pas de la même façon. Les Pipistrelles (PIPGR), dont les Pipistrelles communes (PIPPIP), semblent subir une

influence négative de la présence d'un accotement et de cultures de graminées. Le groupe MYOGR, lui, est positivement influencé par la présence de culture fourragère et d'un ruisseau.

Tableau 10 : Synthèse des résultats significatifs des modèles 8b et 8c.

Variable réponse	Variable explicative	p-valeur	coefficient
PIPGR	Accotement	2,6e-05 (***)	- 1,71
	Graminées	0,029 (*)	- 1,44
PIPIIP	Accotement	7,76e-05 (***)	- 1,64
	Graminées	0,014 (*)	- 1,66
MYOGR	Culture fourragère	0,0447 (*)	2,06
	Ruisseau	0,0139 (*)	1,95
SEROTULES	/	NS	/
EPTSER	/	NS	/

Q9: Les paramètres environnementaux influencent-ils le comportement de chasse des chauves-souris ?

le 9	<i>Chasse</i> ~ accotement + eolienne + graminees + fourrage + colza + prairie permanente extensive + prairie arbre isolé + bosquet + ruisseau + étang, family = binomial
------	--

La régression logistique testant l'influence des paramètres environnementaux sur le comportement de chasse montre que les variables ruisseau, haie, accotement, graminées et prairie de fauche ont, selon les résultats, une influence sur ce comportement (Tableau 11).

La présence d'un ruisseau, d'une haie et d'une prairie de fauche montrent un effet positif sur la chasse des chauves-souris, tandis que la présence d'un accotement et d'une culture de graminées semblent influencer négativement leur comportement de chasse.

Tableau 11 : Synthèse des résultats significatifs du modèle 9.

Variable réponse	Variable explicative	p-valeur	coefficient
Chasse	Ruisseau	1,6e-05 (***)	1,56
	Haie	0,0081 (**)	1,15
	Accotement	0,0031 (**)	- 1,93
	Graminées	0,047 (*)	- 2,15
	Prairie de fauche	0,024 (*)	0,98

Q10: La présence d'éolienne influence-t-elle la présence de chauves-souris sur le site de l'étude ?

Le résultat de la régression logistique utilisée pour tester l'influence de la présence d'éolienne sur le nombre de chauves-souris enregistrées (modèle 10) est très hautement significatif (p-valeur = 1,34e-06). La présence d'éolienne aurait une influence négative sur la présence de chauves-souris (coefficient = - 1,44).

Discussion

Influence des paramètres météorologiques sur la présence et le comportement de chasse des chauves-souris (Q1 - Q2)

L'analyse de la répartition temporelle des chauves-souris (Figure 8) a mis en évidence l'absence de ces dernières le 16/03, le 19/03, le 9/04 et le 13/04. Or, le 16/03 et le 9/04 sont des dates pour lesquelles il y a eu des pertes de données (9 et 19 enregistrements sur 27

respectivement) (voir section *Biais du protocole*). L'absence de chiroptères à ces dates n'est donc pas représentative de la réalité, mais est plutôt liée à un biais du protocole. Les données du 19/03 et du 13/04 sont en revanche complètes.

Les dates pour lesquelles aucune chauve-souris n'a été enregistrée correspondent à des moments où, par rapport à la moyenne totale, il faisait plus froid et la pression atmosphérique était plus élevée (Tableau 12), ce qui est cohérent avec les résultats statistiques (Q1 ; Tableau 5). La vitesse du vent du 19/03 était plus élevée que la moyenne, ce qui correspond également aux résultats statistiques. Cette même variable pour le 13/04 est cependant plus faible que la moyenne (texte souligné dans le tableau 12), mais c'est pour cette date que la valeur minimale de la température et la valeur maximale de la pression atmosphérique furent atteintes (texte en gras dans le tableau 12). Ces conditions météorologiques pourraient expliquer l'absence de chiroptères à ces deux dates.

Tableau 12 : Comparaison des conditions météorologiques lors des sorties de terrain du 19/03 et du 13/04, dates pour lesquelles aucune chauve-souris n'a été détectée. Les valeurs représentent respectivement : minimum < moyenne < maximum. La moyenne totale comprend les valeurs de tous les enregistrements.

	Température (°C)	Vitesse du vent (m/s)	Pression atmosphérique (hPa)
19/03	- 0,4 < 2,1 < 3,8	0 < 1 < 3,1	993 < 995 < 997
13/04	- 1,3 < 1,1 < 3,4	0 < <u>0,2</u> < 0,8	999 < 1001 < 1002
<i>Moyenne totale</i>	- 1,3 < 9,6 < 21,7	0 < 0,7 < 4	972 < 986 < 1002

De plus, les résultats du tableau 6 montrent une distinction entre, d'une part les Pipistrelles et Sérotules (influencées par la température et la vitesse du vent), et d'autre part le groupe MYOGR (influencé par la pression atmosphérique). Cependant, il semble plus probable que cette distinction entre les groupes soit plutôt due à la composition de l'échantillon. En effet, les Murins étant plus faiblement représentés, il se pourrait que la régression logistique ait mis en évidence un effet significatif qui soit, en réalité, dû au fait que les espèces discrètes comme les Murins aient une plus grande probabilité d'être enregistrées lorsque les conditions météorologiques sont favorables.

Le modèle 2 testant les conditions météorologiques sur le comportement de chasse des chauves-souris a donné les mêmes résultats (Q2 : Tableau 7). Il semblerait donc que ce comportement ne soit pas différemment influencé par les variables météorologiques, et que ce résultat renforce aussi ceux sur la présence des chauves-souris (Tableau 5).

Dans l'ensemble, selon les résultats obtenus, l'activité des chauves-souris est influencée par des conditions météorologiques telles que la température, la vitesse du vent, et la pression atmosphérique. Ceci est appuyé par d'autres études qui ont également obtenus des résultats sur l'influence positive des températures (e.g. Rodrigues *et al.*, 2008). Lorsque les températures sont plus faibles, l'abondance en insectes diminue, ce qui expliquerait la faible activité des chauves-souris à ces moments-là (Taylor, 1963). De plus, plusieurs études, dont celle de Martin *et al.* (2017), ont également mis en évidence l'influence négative du vent sur la présence de chiroptères. L'effet négatif de la pression atmosphérique est inattendu. En effet, des valeurs de pression atmosphérique élevées (> 1010 hPa) traduisent notamment des vitesses de vent plus faibles (Météo Contact, 2015 - 2021) donc l'effet de la pression atmosphérique sur la présence de chauves-souris serait plutôt positif (Rydell *et al.*, 2010a).

Cependant, il est important de remettre les résultats dans le contexte de cette étude. Ceux-ci ne concernent effectivement qu'un morceau de parc éolien (3 éoliennes sur une dizaine) représenté par un transect unique sur lequel les données ont été récoltées pendant 3 mois (et se sont arrêtées au début de l'envol des premiers juvéniles). Le fait que d'autres études appuient les résultats obtenus met quand même en évidence la pertinence de ceux-ci.

Influence des paramètres environnementaux sur la présence et le comportement de chasse des chauves-souris (Q3 - Q10)

Dans le premier ensemble de tests, seuls le **stade fleuri des haies** (Q3) et le **stade épis des cultures de graminées** (Q5) semblent influencer positivement la présence de chiroptères (Tableau 8). L'effet positif des haies fleuries sur la présence de chiroptères peut s'expliquer par l'abondance et/ou la diversité supérieure d'insectes autour des haies lorsqu'elles sont fleuries (Natagora, s.d.). Les chauves-souris pourraient donc être attirées par ces haies pour s'y nourrir. C'est en effet ce que met en évidence le tableau 11 (Q10). La présence de haies a un effet significatif positif sur le comportement de chasse. L'influence positive qu'auraient les graminées lorsqu'elles sont au stade épis peut être due à un biais de la saison. En effet, les graminées atteignaient le stade épis à partir du 23/05, date à partir de laquelle le nombre de contacts de chauves-souris augmentait, probablement suite aux conditions météorologiques plus favorables.

Les variables n'ayant pas d'effet significatif sont la floraison des accotements, des cultures fourragères et de colza (Q4, Q6, Q7 respectivement : Tableau 8). Ces résultats pourraient

s'expliquer par leur caractère anthropique. Le passage de tracteurs, le traitement des cultures *etc.* pourraient représenter des micro-habitats défavorables aux chauves-souris, qu'ils soient fleuris ou non. Selon les données, aucune chauve-souris n'a jamais été détectée à l'habitat 26 (Figure 8). En analysant de plus près la composition de cet habitat (Figure 9), il est constaté que l'habitat 26 est majoritairement représenté par des micro-habitats "anthropisés" : les chemins et leurs accotements, les cultures de colza et une prairie permanente. Seule la haie (< 10 %) est un micro-habitat "naturel".

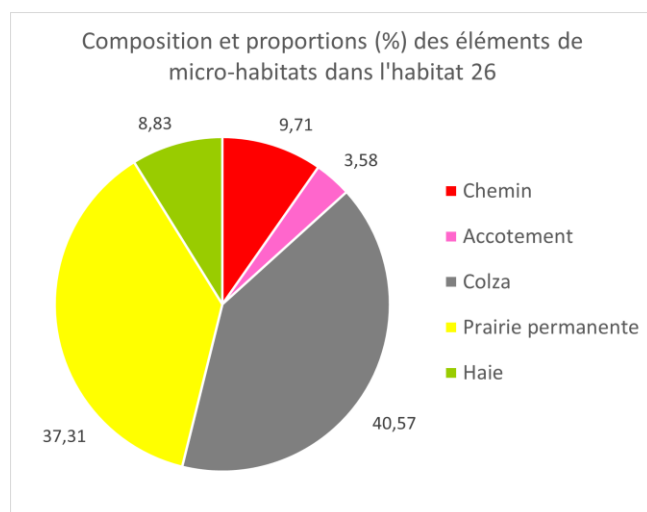


Figure 9 : Représentation de la composition de l'habitat 26 et proportions des différents micro-habitats.

De façon plus globale, le modèle 9a tentait de mettre en évidence l'influence des micro-habitats sur la présence de chauves-souris (Q9 : Tableau 9). Cette régression logistique a permis de mettre en évidence l'influence négative de la présence d'un **accotement** et de **cultures de graminées** sur la présence de chiroptères. Ces influences négatives peuvent également être expliquées par l'anthropisation. En effet, là où il y a des accotements il y a, par définition, des chemins. Indirectement, la présence de chemins signifie fragmentation de l'habitat donc les points d'enregistrement où il y a avait un accotement pourraient être des endroits non favorables à la présence de chauves-souris, comme l'HAB 26 représenté en figure 9. En ce qui concerne l'effet négatif de la présence de cultures de graminées, il peut également s'expliquer par le facteur anthropique (monocultures de graminées) et appuie l'hypothèse suggérée quant à la significativité de l'influence positive du stade épis des graminées sur la présence de chiroptères (Q5 : Tableau 8). En effet, ce dernier effet pourrait ne pas être réel mais plutôt lié à un biais de l'échantillon comme discuté plus haut.

Une autre variable qui possédait une p-valeur significative est la présence d'un **ruisseau** mais celle-ci montrait une influence positive sur la présence de chauves-souris (Tableau 9). Ce

résultat n'est pas surprenant car un ruisseau est un élément paysager qui crée un corridor en soi, au même titre que les haies par exemple. Dans ce test statistique, la présence de haies n'a pas montré d'effet significatif selon les seuils conventionnels de significativité¹⁸ (p-valeur = 0,09, coefficient = 0,42).

De plus, les résultats de la régression logistique sur le comportement de chasse ont mis en évidence une influence significative positive de la présence de haies et d'un ruisseau (Q9 : Tableau 11). Ce sont en effet des milieux de gagnage de prédilection pour de nombreuses espèces (Arthur & Lemaire, 2015). La présence de **prairies de fauche** a aussi une influence positive sur la chasse des chauves-souris. Une hypothèse qui pourrait expliquer cet effet est la composition végétale de ces prairies de fauche. Sur le terrain, la diversité d'espèces végétales était remarquable, ce qui a probablement un effet positif sur la diversité de l'entomofaune présente. De plus, ces prairies ont été fauchées pendant la période de récolte des données et la fauche provoque la levée des insectes¹⁹ dont viennent se nourrir les chauves-souris. Ceci appuie l'effet positif de ces prairies sur la chasse des chauves-souris.

Comme pour le test sur la présence des chauves-souris, les graminées et les accotements montrent un effet négatif sur le comportement de chasse. Ceci n'est pas étonnant car, d'une part, ces résultats sont intimement liés aux présences de chauves-souris, et d'autre part, ces éléments de micro-habitats sont probablement plus anthropisés et plus pauvres en entomofaune.

En ce qui concerne l'analyse au niveau des groupes d'espèces (Q8 : Tableau 10), les Sérotules (dont les Sérotines communes) est le seul groupe ne subissant aucun effet significatif des variables environnementales. Cela peut être dû au comportement plus opportuniste de ces espèces et de la Sérotine commune en particulier, qui est plus flexible dans le choix des habitats de chasse notamment (Arthur & Lemaire, 2015) et qui est sur-représentée dans l'échantillon. En effet, l'analyse de la distribution spatiale des chiroptères enregistrés (Figure 8) met en évidence la présence de sérotules à presque tous les habitats²⁰ (21 habitats sur 27).

Une distinction au sein du groupe PIPGR et MYOGR est à nouveau mise en évidence par les résultats. Les Pipistrelles sont influencées négativement par la présence d'accotements et de

¹⁸ Seuils de significativité conventionnels : < 0,05 (*), < 0,01 (**), < 0,001 (***).

¹⁹ Brusquement après la fauche, une levée d'insectes se produit sur les 48h après la fauche. Communication personnelle de Yves Laurent.

²⁰ Le seul contact enregistré à l'HAB 23 est, après vérification, une sérotule qui n'a pas su être identifiée jusqu'à l'espèce (un seul contact pour cet habitat : NOSP) (voir figure 8).

cultures de graminées comme pour l'analyse sur toutes les espèces confondues, ce qui n'est pas étonnant car ce groupe est largement sur-représenté dans l'échantillon total (72 %, Tableau 4). Le groupe MYOGR est, quant à lui, exclusivement positivement influencé par la présence d'une culture fourragère et d'un ruisseau. Au sein des Murins, certaines espèces font partie du groupe "pêcheurs" dont le Murin de Daubenton ($n = 6$) (LPO, 2007 - 2017), ce qui expliquerait cette influence positive du ruisseau sur la présence du groupe MYOGR en particulier. L'effet positif de la culture fourragère sur la présence de Murins peut être expliqué par la composition des micro-habitats (Annexe VI). En effet, une seule culture fourragère a été répertoriée sur tout le transect, ce qui peut représenter un biais. Elle est incluse dans le rayon de 20 m des HAB 20 (~ 30 %) (Figure 10b) et HAB 21 (~ 43 %). L'habitat 20 est, avec l'habitat 17, celui pour lequel le nombre de contacts de Murins est le plus élevé ($n = 5$) (Figure 8). L'effet significatif de la culture fourragère sur la présence de Murins est soit liée à un biais de l'échantillon, soit liée à la diversité d'espèces végétales concentrées sur cette culture (comme pour la prairie de fauche). Cependant, cette dernière explication s'appliquerait à toutes les espèces de chauves-souris.

De manière générale, la figure 8 a mis en évidence deux habitats pour lesquels le nombre de contacts était le plus élevé. Il s'agit de l'HAB 05 ($n = 26$) et HAB 20 ($n = 27$) (Figure 10a et b). L'habitat 05 est composé à 96,1 % de micro-habitats naturels (bosquet, ruisseau et zone humide). Parmi ceux-ci, le ruisseau semble, selon les résultats statistiques, le micro-habitat qui influence positivement la présence de chauves-souris (Tableaux 9 - 11). L'habitat 20, lui, est composé à ~ 50 % de micro-habitats "anthropisés", dont ~ 30 % de culture fourragère et ~ 20 % de prairie permanente.

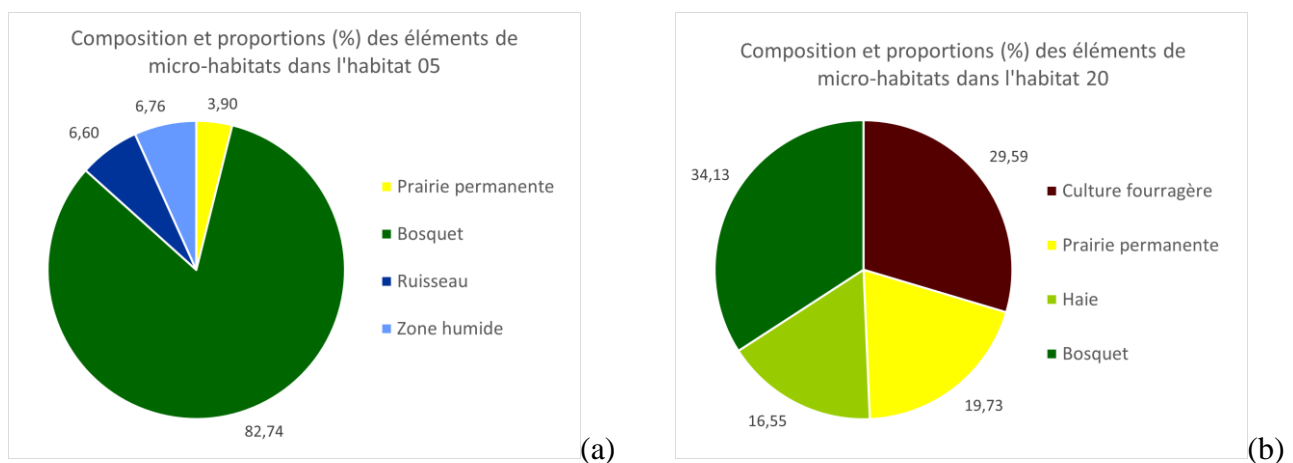


Figure 10 : Représentation de la composition des habitats 05 (a) et 20 (b) et proportions des différents micro-habitats.

Finalement, la dernière régression logistique appliquée avait pour objectif de tester si la **présence d'une éolienne** avait une influence sur la présence de chauves-souris, toutes espèces confondues. En amont, la Figure 8 semblait montrer que là où il y avait des éoliennes (A : HAB 01, B : HAB 10-11 et C : HAB 27), le nombre de contacts était plus faible. Cette tendance fut confirmée par la régression logistique appliquée (Q10). En effet, le résultat très hautement significatif et négatif suggère que là où il y a une éolienne, il y a moins de chauves-souris. Cependant, il est difficile, sur base des résultats de cette étude, de confirmer que cet effet est directement lié à la présence d'éolienne. Il se pourrait aussi qu'il soit dû à l'endroit où les éoliennes sont construites, c'est-à-dire, d'une part, sur des crêtes pour rentabiliser l'accès au vent (et la vitesse du vent a une influence négative sur la présence de chauves-souris), et d'autre part, sur des terrains généralement exploités par l'agriculture (la présence de cultures de graminées a aussi une influence négative sur la présence de chauves-souris), ou plus anthropisés de manière générale (les accotements ont également montré un effet négatif sur la présence de chiroptères) (Figure 11).

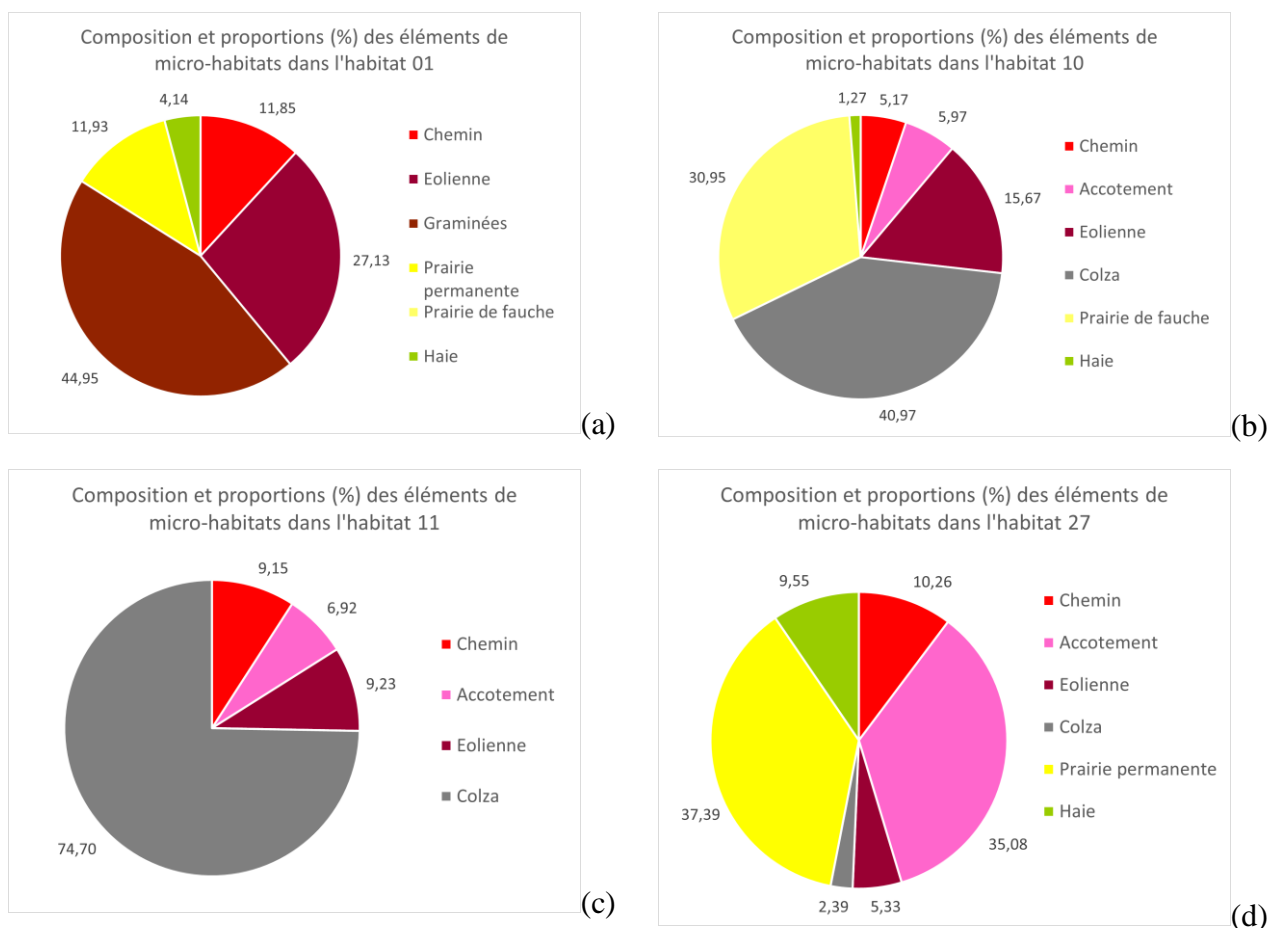


Figure 11 : Représentation de la composition des habitats contenant une éolienne : HAB 01 (a), HAB 10 (b), HAB 11 (c) et HAB 27 (d).

Pour savoir avec certitude ce à quoi cet effet négatif est réellement dû, il faudrait faire des études avant l'installation des éoliennes pour comparer l'activité des chauves-souris avant et après leur installation afin de savoir si le faible nombre de contacts est lié à la présence d'éoliennes en tant que telle ou lié aux paramètres du site (crêtes, agriculture, ...).

Limites de l'étude

Biais du protocole

Lors de la récolte de données, il est arrivé que certains enregistrements ne puissent être faits, et ce, pour plusieurs raisons. D'une part, certains points d'enregistrement ont dû être passés car trop de retard avait été accumulé en passant d'un point à l'autre (une marge d'erreur de ≤ 1 minute était acceptée, au-delà, il fallait passer directement au point suivant). Ce retard pouvait être dû à une difficulté de traverser un barbelé, une chute, *etc.* D'autre part, comme le transect traversait des prairies permanentes, il fallait parfois marcher entre les vaches. Celles-ci ont rarement montré un comportement agressif mais il est une fois arrivé que la moitié des données n'aient pu être récoltées car elles ont empêché de traverser leur prairie (arrêt à l'HAB 14 sur 27, 18/05).

De plus, lorsque la pluie était trop forte, il a fallu arrêter les enregistrements et s'abriter car le matériel acoustique (le micro et la tablette) est sensible à l'humidité et à l'eau. Si la pluie diminuait, les enregistrements reprenaient au point où il fallait être à l'heure exacte de la reprise du protocole. Pour la première date de récolte de données, 9 enregistrements n'ont pu être pris à cause de la pluie (reprise à l'HAB 18 vers HAB 01, 16/03). Le 9 avril, ce sont 19 enregistrements sur 27 qui ont été passés. Il a plu dès le début du transect mais une tentative de reprise du protocole a été tentée à partir de l'HAB 22 (vers l'HAB 01) mais il a fallu à nouveau arrêter à l'HAB 13 à cause de la pluie.

Une des limites de l'étude est associée à la répartition des points d'enregistrement sur le transect. En effet, il se peut qu'il y ait des biais dans les analyses car les points sont relativement proches les uns des autres, répartis non aléatoirement, et qu'une certaine continuité écologique existe entre eux.

Au-delà de ces biais, la complexité du protocole mis en place a exigé beaucoup d'efforts dépassant ceux à fournir sur le terrain *stricto sensu*. En effet, il a fallu maintenir une certaine rigueur pour organiser chaque sortie de terrain au jour le jour (car dépendantes de la météo), pour s'assurer qu'au minimum deux accompagnants seraient présents (sans qui le protocole n'était pas applicable), pour préparer les fiches météo ainsi que le timing précis à respecter, pour encoder chaque lendemain de terrain les notes vocales dans la base de données brutes, *etc.* et ce, tous les quatre jours en moyenne sur une période de trois mois.

Biais liés au suivi chiroptérologique par l'acoustique

Les techniques d'enregistrement des ultrasons sont de plus en plus performantes mais ont leurs limites (Figure 12).

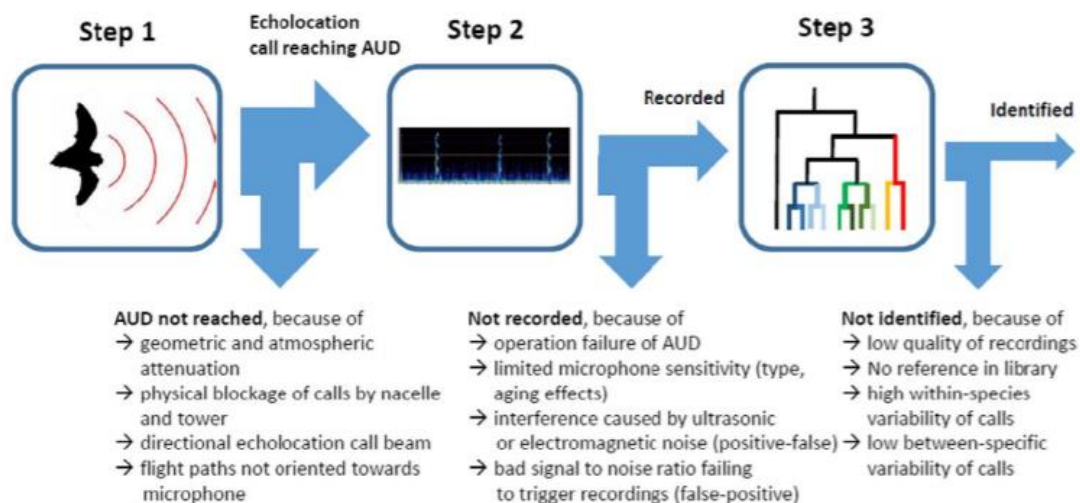


Figure 12 : Représentation schématique des étapes du suivi chiroptérologique par une méthode acoustique (Voigt *et al.*, 2021). AUD : *automated ultrasonic detectors*.

Par exemple, lorsque la batterie de la tablette sur laquelle est branché le micro est faible, la portée d'enregistrement diminue²¹. De plus, la portée de l'écholocalisation des chauves-souris n'est pas infinie et variable entre les espèces (Vanpeene, 2018). Il suffirait qu'une espèce de chauve-souris à faible portée (les Oreillards par exemple) soit un peu éloignée pour qu'elle ne soit pas détectée par le micro.

Lors de l'analyse des sonogrammes, il n'est pas toujours aisé d'avoir une idée du nombre d'individus enregistrés (raison pour laquelle il s'agit d'un nombre de contacts et pas d'abondance). Le nombre d'individus détectés est alors estimé. Dans le cadre de cette étude,

²¹ Communication personnelle de Yves Laurent.

lorsque plus d'un individu de la même espèce étaient distinguables sur une même bande son, il a été considéré que deux individus ont été enregistrés. Cependant, ceci a été choisi pour être le plus proche de la réalité et le plus juste possible, mais il faut considérer cela comme un minimum. En effet, il est très probable qu'au moins deux individus aient été détectés, mais il se pourrait qu'il y en ait plus. De plus, les identifications ne sont, elles aussi, pas toujours aisées. En effet, lorsqu'il n'y a qu'un seul cri sur toute une bande son, il est impossible de prendre plusieurs mesures et de les comparer. C'est une des raisons pour laquelle certains individus ont été classés dans les groupes mais n'ont pas été identifiés jusqu'à l'espèce.

Perspectives - Mesures de conservation des chiroptères, cas du parc éolien de Mesnil-Saint-Blaise

Grâce aux résultats pertinents de cette étude, il est possible d'imaginer comment des mesures de conservation pourraient être appliquées, voire mises en place.

Actuellement, seul le bridage des éoliennes existe comme **mesure d'atténuation** pour les chiroptères en Belgique. Les conditions météorologiques testées dans le cadre de cette étude montrent une influence sur la présence des chauves-souris. Dès lors, éteindre les éoliennes lorsque les conditions favorables à leur sortie sont atteintes permettrait de limiter les risques de mortalité. Les seuils actuels pour le bridage sont, pour la vitesse du vent : $< 6 \text{ m/s}$ (Arnett *et al.*, 2010) et pour la température : à partir de 8 °C (Rodrigues *et al.*, 2008).

Suite aux résultats de cette étude, quelques nouvelles idées de mesures de conservation émergent. Plusieurs perspectives sont possibles. Premièrement, mieux sélectionner les sites où les parcs éoliens seront construits en évitant d'une part les sites riches en éléments attractifs pour les chauves-souris, ou en se dirigeant vers des sites à caractère plutôt répulsif (ou défavorable) pour ces dernières. Ensuite, une perspective d'éloignement des chauves-souris en restaurant des habitats qui leur sont favorables plus loin peut être abordée.

Une première idée pourrait être de **renforcer les refus de constructions** de parcs éoliens lorsque le site proposé est traversé par un ruisseau par exemple. En effet, selon les résultats de cette étude, cet élément de l'environnement a un effet significatif positif sur la présence de chauves-souris et est un milieu de prédilection pour la chasse.

De plus, si les futurs parcs éoliens étaient construits uniquement sur des terres cultivées de graminées, les **risques de rencontres entre les éoliennes et les chauves-souris diminueraient** car les résultats ont montré une influence significative négative de ces cultures sur la présence de chauves-souris.

Sachant que la floraison des haies a un effet significatif positif sur la présence des chauves-souris (Q3), une action de plantation de haies composées d'essences riches en fleurs à quelques dizaines/centaines de mètres en dehors de la zone du parc éolien pourrait devenir une mesure de conservation. De plus, varier les essences composant les haies selon leurs périodes de floraison permettrait d'augmenter le temps où l'ensemble des haies serait fleuri. Ceci dans le but d'**éloigner les chauves-souris d'un parc éolien existant de manière durable.**

Conclusion

Les impacts qu'a l'industrie éolienne sur la faune sauvage et sur les chiroptères en particulier ne sont pas négligeables et sont divers. Qu'il s'agisse d'impacts indirects tels que des perturbations liées à la dégradation de l'habitat, ou d'impacts directs sur les individus comme les collisions et le barotraumatisme, les taux de mortalité des chauves-souris en parcs éoliens sont élevés. Les raisons pour lesquelles les chauves-souris fréquentent les éoliennes ne sont encore qu'au stade d'hypothèses, car il est laborieux de les tester au vu du mode de vie nocturne et discret des chiroptères. Il est donc primordial de continuer à étudier les chauves-souris, et ce, à de plus larges échelles spatio-temporelles afin de mieux comprendre ce qui influence leur activité de manière générale, et au sein de parcs éoliens. Cette étude fut limitée en temps car rentre dans un cadre relativement restreint d'un mémoire, mais a tout de même permis de mettre en évidence des résultats pertinents et confirmés, pour certains, par la littérature. En effet, l'influence positive de la température sur leur présence ainsi que l'influence négative de la vitesse du vent ont déjà été mis en évidence par d'autres études. Concernant le volet de tests sur les paramètres environnementaux, ceux-ci ont également montré des résultats pertinents, plutôt liés à la biologie des chiroptères, notamment leur comportement alimentaire. Une distinction dans l'interprétation des résultats a été discutée ; d'une part, les effets positifs d'éléments naturels des habitats, et d'autre part, les effets négatifs des éléments anthropisés présents. En effet, la présence d'un ruisseau et la floraison des haies représentaient les éléments à influence positive, tandis que la présence d'un accotement, de cultures (de graminées en particulier) et d'une éolienne montraient un effet négatif sur la présence des chauves-souris.

De manière générale, les résultats obtenus ont permis d'élargir les perspectives du sujet afin d'imaginer des mesures de conservation basées sur les résultats de cette étude. Le peu de mesures de conservation mises en place pour les chauves-souris reflète le manque de connaissances à leur propos et met en évidence le besoin d'études scientifiques à plus large échelle sur ce sujet, afin d'optimiser leur protection.

Bibliographie

- Altringham, J.D. (2011). *Bats: From evolution to conservation*. Oxford: Oxford University Press.
- Amorim, F., Rebelo, H. & Rodrigues, L. (2012). Factors influencing bat activity and mortality at a wind farm in the Mediterranean region. *Acta Chiropterologica* 14: 439-457.
- Appel, G., López-Baucells, A., Ernest-Magnusson, W. and Bobrowiec, P.E.D., (2017). Aerial insectivorous bat activity in relation to moonlight intensity. *Mammalian Biology*, 85(1), pp.37-46.
- Arnett, E.B., Brown, W.K., Erickson, W.P., Fiedler, J.K., Hamilton, B.L., Henry, T.H., Jain, A., Johnson, G.D., Kerns, J., Koford, R.R., Nicholson, C.P., O'Connell, C.J., Piorkowski, M.D. & Tankersley, R.D., Jr (2008) Patterns of bat fatalities at wind energy facilities in North America. *Journal of Wildlife Management* 72: 61-78.
- Arnett, E.B., Huso M.M.P., Schirmacher, M.R., Hayes, J.P. (2010). Altering turbine speed reduces bat mortality at wind-energy facilities. *Front Ecol Environ* 2010.
- Arthur, L., Lemaire, M. (2015). *Les Chauves-souris de France, Belgique, Luxembourg et Suisse*. Biotope, Mèze (Collection Parthénopé), Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 2e éd., 544 p.
- Baerwald, E.F., D'Amours, G.H., Klug, b.j. & Barclay, R.M.R. (2008). Barotrauma is a significant cause of bat fatalities at wind turbines. *Current Biology* 18: R695-R696.
- Baerwald, E.F. & Barclay, R.M.R. (2011). Patterns of activity and fatality of migratory bats at a wind energy facility in Alberta, Canada. *Journal of Wildlife Management* 75: 1103-1114.
- Barataud, M. (2015). *Acoustic Ecology of European Bats. Species Identification, Study of their Habitats and Foraging Behaviour*.
- Barclay, R.M.R., Baerwald, E.F. & Gruver, J.C. (2007). Variation of bird and bat fatalities at wind energy facilities: assessing the effects of rotor size and tower height. *Canadian Journal of Zoology*. 85: 381-387.
- Barclay, R.M.R. (1991). Population structure of temperate zone insectivorous bats in relation to foraging behaviour and energy demand. *Journal of Animal Ecology* 60: 165-178.
- Barclay, R.M.R. & Harder, L.D. (2003). Life histories of bats: life in the slow lane. In Kunz, T.H. & Fenton, M.B. (eds) *Ecology of bats*. Chicago, IL: University of Chicago Press. pp. 209-253.
- Behr, O., Eder, D., Marckmann, U., Mette-Christ, H., Reisinger, N., Runkel, V. & von Helversen, O. (2007). Akustisches Monitoring in Rotorbereich von Windenergieanlagen und

Metodische Probleme beim Nachweis von Fledermaus-Schlagopfern - Ergebnisse aus Untersuchungen im mittleren und südlichen Schwarzwald. *Nyctalus (N.F.)* 12: 115-127.

Brownlee, S.A. & Whidden, H.P. (2011). Additional evidence for barotrauma as a cause of bat mortality at wind farms. *Journal of the Pennsylvania Academy of Science* 85: 147-150.

Calvert, A.M., Bishop, C.A., Elliot, R.D., Krebs, E.A., Kydd, T.M., Machtans, C.S. & Robertson, G.J. (2013). A synthesis of human-related avian mortality in Canada. *Avian Conservation & Ecology* 8 (2): 11.

Conseil européen (2021). Changement climatique : ce que fait l'UE. Section *Politiques*, *En Bref*. Consulté le 20 août à l'adresse : <https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/climate-change/>

COP26 (2021). UN Climate Change Conference UK 2021. Consulté le 16/08 à l'adresse : <https://ukcop26.org/>

Crawford, R.L. & Baker, W.W. (1981). Bats killed at a north Florida television tower: a 25-year record. *Journal of Mammalogy* 62: 651-652.

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. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111:15126-15131

Cryan, P.M., Jameson, J.W., Baerwald, E.F., Willis, C.K.R., Barclay, R.M.R., Snider, E.A. & Crichton, E.G. (2012). Evidence of late-summer mating readiness and early sexual maturation in migratory tree-roosting bats found dead at wind turbines. *PLoS ONE* 7 (10): e47586.

Cryan, P.M., (2008). Mating behavior as a possible cause of bat fatalities at wind turbines. *Journal of Wildlife Management* 72: 845-849.

Cryan, P.P. & Barclay, R.M.R. (2009). Causes of bat fatalities at wind turbines: hypotheses and predictions. *Journal of Mammalogy* 90: 1330-1341.

CSBQ (Chauves-Souris Quebec) (s.d.). Apprendre - Écholocalisation. Consulté le 20/08 à l'adresse : <https://chauve-souris.ca/echolocalisation>

Drewitt, A.L. & Langston, R.H.W. (2008). Collision effects of wind-power generators and other obstacles on birds. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1134: 233-266.

Elia Group (2020). Mix électrique 2020 en Belgique: la production renouvelable augmente de 31% au cours d'une année marquée par la crise du Covid-19. Communiqué de presse du 7 janvier 2020, Bruxelles.

Erickson, W.P., Wolfe, M.M., Bay, K.J., Johnson, D.H. & Gehring, J.L. (2014). A comprehensive analysis of small-passerine fatalities from collision with turbines at wind energy facilities. *PLoS ONE* 9 (9): e107491.

European Union (EU) (1992) Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora. *Official Journal of the European Communities* L206/7 (22.7.92). Retrieved 7 September 2016 http://ec.europa.eu/environment/nature/legislation/habitatsdirective/index_en.htm

European Union (EU) (2009) Directive 2009/147/EC of the European Parliament and of the council of 30 November 2009 on the conservation of wild birds (codified version). *Official Journal of the European Communities* L207 (26.1.2010). Retrieved 7 September 2016 from http://ec.europa.eu/environment/nature/legislation/birdsdirective/index_en.htm

Everaert, J. & Stienen, E.W.M. (2007). Impact of wind turbines on birds in Zeebrugge (Belgium) *Biodiversity and Conservation* 16: 3345-3359

Escobar, L.E., Juarez, C., Medina-Vogel, G. & Gonzalez, C.M. (2015). First report on bat mortalities on wind farms in Chile. *Gayana* 79: 11-17.

EUROBATS (2015). Eurobats agreement text Retrieved 29 December 2015 from http://www.eurobats.org/official_document/agreement_text

Fleming, T.H., Geiselman, C. & Kress, W.J. (2009). The evolution of bat pollination: a phylogenetic perspective. *Annals of Botany* 104: 1017-1043.

Futura Sciences (2020). Définition du crépuscule. Catégorie *Univers*. Consulté le 13/08 à l'adresse : <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/univers-crepuscule-5210/>

Georgiakakis, P., Kret, E., Carcamo, B., Doutou, B., Kafkaletou-Diez, A., Vasilakis, D. & Papadatou, E. (2012). Bat fatalities at wind farms in northeastern Greece. *Acta Chiropterologica* 14: 459-468.

Grodsky, S.M., Behr, M.J., Gendler, A., Drake, D., Dieterle, B.D., Rudd, R.J. & Walrath, N.L. (2011). Investigating the causes of death for wind turbine-associated bat fatalities. *Journal of Mammalogy* 92: 917-925.

Grodsky, S.M., Jennelle, C.S., Drake, D. & Virzi, T. (2012). Bat mortality at a wind-energy facility in southeastern Wisconsin. *Wildlife Society Bulletin* 36: 773-783.

GWEC (Global Wind Energy Council) (2021). Global Wind Report 2021. Published on 25 March 2021.

Henry, M. & Jouard, S. (2007). Effects of bat exclusion on patterns of seed rain in tropical rain forest in French Guiana. *Biotropica* 39: 510-518.

Horn, J.W., Arnett, E.B. & Kunz, T.H. (2008). Behavioral responses of bats to operating wind turbines. *Journal of Wildlife Management* 72: 123-132

Jain, A.A., Koford, R.R., Hancock, A.W. & Zenner, G.G. (2011). Bat mortality and activity at a northern Iowa wind resource area. *American Midland Naturalist* 165: 185-200.

Jones, N.F. & Pejchar, L. (2013). Comparing the ecological impacts of wind and oil & gas development: a landscape scale assessment. *PLoS ONE* 8 (11): e81391.

Kelm, D.H., Lenski, J., Kelm, V., Toelch, U. & Dziok, F. (2014). Seasonal activity in relation to hedgerows in an agricultural landscape in central Europe and implications for wind energy development. *Acta Chiropterologica* 16: 65-73.

Klug, B.J. & Baerwald, E.F. (2010). Incidence and management of live and injured bats at wind energy facilities. *Journal of Wildlife Rehabilitation* 30: 11-16.

Kunz, T.H., Arnett, E.B., Cooper, B.M., Erickson, W.P., Larkin, R.P., Mabee, T., Morrison, M.L., Strickland, M.D. & Szewczak, J.M. (2007). Assessing impacts of wind-energy development on nocturnally active birds and bats: a guidance document. *Journal of Wildlife Management* 71: 2449-2486.

Kunz, T.H., Braun de Torrez, E., Bauer, D. & Lobova, T. (2011). Ecosystem services provided by bats. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1223: 1-38.

Lehnert, L.S., Kramer-Schadt, S., Schonborn, S., Lindecke, O., Niermann, I. & Voigt, C.C. (2014). Wind farm facilities in Germany kill noctule bats from near and far. *PLoS ONE* 9 (8): e103106.

Leopardi, S., Blake, D. & Puechmaille, S.J. (2015). White-nosesyndrome fungus introduced from Europe to North America. *Current Biology* 25: R217-219.

LPO (2007 - 2017). Groupe Chiroptères de la LPO Rhône-Alpes. Atlas Chauves-souris - Les chauves-souris de Rhône-Alpes. Consulté le 12 août à l'adresse : <https://atlascs.fauneauvergnerhonealpes.org/monographies/murins/murin-de-daubenton/>

Long, C.V., Flint, J.A. & Lepper, P.A. (2011). Insect attraction to wind turbines: does colour play a role? *European Journal of Wildlife Research* 57: 323-331.

Martin CM, Arnett EB, Stevens RD, Wallace MC (2017). Reducing bat fatalities at wind facilities while improving the economic efficiency of operational mitigation. *Journal of Mammalogy* 98: 378–385.

Medellin, R.A. & Gaona, O. (1999). Seed dispersal by bats and birds in forest and disturbed habitats of Chiapas, Mexico. *Biotropica* 31: 478-485.

Météo Contact (2015 - 2021). La pression atmosphérique. Cours météo. Consulté le 19 août à l'adresse : <https://www.meteocontact.fr/pour-aller-plus-loin/la-pression-atmospherique>

Minderman, J., Pendlebury, C.J., Pearce-Higgins, J.W. & Park, K.J. (2012). Experimental evidence for the effect of small wind turbine proximity and operation on bird and bat activity. *PLoS ONE* 7 (7): e41177.

Morris, A.D., Miller, D.A. & Kalcounis-Rueppell, M.C. (2010). Use of forest edges by bats in a managed pine forest landscape. *Journal of Wildlife Management* 74: 26-34.

Muñoz, P.T., Torres, F.P. & Megias, A.G. (2014). Effects of roads on insects: a review. *Biodiversity and Conservation* 24: 659-682.

Natagora (s.d.). La haie d'espèces indigènes. Article rédigé dans la campagne *Accueillez la Nature dans votre Jardin !*. Consulté le 18 août à l'adresse : <https://natureaujardin.natagora.be/index.php?id=1017>

Nabli, H., Bailey, W.C. & Necibi, S. (1999). Beneficial insect attraction to light traps with different wavelengths. *Biological control* 16: 185-188.

Piorkowski, M.D. & O'Connell, T.J. (2010). Spatial pattern of summer bat mortality from collisions with wind turbines in mixed-grass prairie. *American Midland Naturalist* 164: 260-269.

Perrow, M.R. (2017). *Wildlife and Wind Farms, Conflicts and Solutions. Volume 1 Onshore : Potential Effects*. Pelagic Publishing, Exeter, UK.

Pfalzer, G., & Kusch, J. (2003). Structure and variability of bat social calls: implications for specificity and individual recognition. *Journal of Zoology*, 261(1), 21-33.

PNAC - Plan National d'Actions Chiroptères (s.d.). La protection des chauves-souris, l'enjeu d'un réseau. Les chauves-souris. Consulté le 10 août à l'adresse : <https://plan-actions-chiropteres.fr/les-chauves-souris>

Portail Wallonie (s.d.). La Biodiversité en Wallonie - Les chauves-souris de Belgique. Consulté le 13 août à l'adresse : <http://biodiversite.wallonie.be/fr/nos-especes.html?IDC=5579>

Rodrigues, L., Bach, L., Dubourg-Savage, M.-J., Karapandza, B., Kovac, D., Kervyn, T., Dekker, J., Kepel, A., Bach, P., Collins, J., Harbusch, C., Park, K., Micevski, B. & Minderman, J., (2015). Guidelines for consideration of bats in wind farm projects - Revision 2014, EUROBATS Publication Series No. 6. Bonn: UNEP/EUROBATS Secretariat.

Racey, P.A. & Entwistle, A.C. (2000). Life-history and reproductive strategies of bats. In Crichton, E.G. & Krutsch, P.H. (eds) *Reproductive Biology of Bats*. San Diego, CA: Academic Press. pp. 363-414.

Richardson, P. (1985). *Bats. Whittet Books, Printed by Biddles of Guildford*. Great Britain. ISBN 0-905483-41-3

Rodrigues, L., Bach, L., Dubourg-Savage, M.-J., Goodwin, J. & Harbusch, C. (2008). Guidelines for consideration of bats in wind farm projects. EUROBATS Publication Series No 3. Bonn: UNEP/EUROBATS Secretariat.

Roemer, C., Bas, Y., Disca, T., & Coulon, A. (2019). Influence of landscape and time of year on bat-wind turbines collision risks. *Landscape Ecology* , 34 (12), 2869-2881.

Rollins, K.E., Meyerholz, D.K., Johnson, G.D., Capparella, A.P., Loew, S.S. (2012). A forensic investigation into the etiology of bat mortality at a wind farm: barotrauma or traumatic injury? *Veterinary Pathology Online* 49:362-371.

Rydell, J., Bach, L., Dubourg-Savage, M.J., Green, M., Rodrigues, L. & Hendenström, A. (2010a). Bat mortality at wind turbines in northwest Europe. *Acta Chiropterologica* 12: 261-274.

Rydell, J., Bach, L., Dubourg-Savage, M.-J., Green, M., Rodrigues, L. & Hendenström, A. (2010b). Mortality of bats at wind turbines links to nocturnal insect migration? *European Journal of Wildlife Research* 56: 823-827.

Rydell, J., Engström, H., Hedenström, A., Kyed-Larsen, J., Petterson, J., & Green, M. (2012). The effect of wind power on birds and bats: a synthesis report. Report 6511. Stockholm: Swedish Environmental Protection Agency. Retrieved 28 December 2015 from <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-6511-9.pdf>

Rydell, J., & Wickman, A. (2015). Bat activity at a small wind turbine in the Baltic Sea. *Acta Chiropterologica* 17: 359-364.

Santos, H., Rodrigues, L., Jones, G., Rebelo, H. (2013). Using species distribution modelling to predict bat fatality risk at wind farms. *Biological Conservation* 157: 178-186.

Smallwood, K.S. (2013). Comparing bird and bat fatality-rate estimates among North American wind-energy projects. *Wildlife Society Bulletin* 37: 19-33

Sovacool, B.K. (2009). Contextualizing avian mortality: a preliminary appraisal of bird and bat fatalities from wind, fossil-fuel, and nuclear electricity. *Energy Policy* 37: 2241-2248.

Sovacool, B.K. (2013). The avian benefits of wind energy: a 2009 update. *Renewable Energy* 49: 19-24.

Speakman, J.R., Anderson, M.E. & Racey, P.A. (1989). The energy cost of echolocation in pipistrelle bats (*Pipistrellus pipistrellus*). *Journal of Comparative Physiology A* 165: 679-685.

Staton, T. & Poulton, S. (2012). Seasonal variation in bat activity in relation to detector height: a case study. *Acta Chiropterologica* 14: 401-408.

Taylor, L.R. (1963). Analysis of the effect of temperature on insects in flight. *Journal of Animal Ecology* 32: 99-117.

Tidhar, D., Sonnenberg, M. & Young, D. (2013). 2012 Post-construction carcass monitoring study for the Beech Ridge wind farm Greenbrier County, West Virginia. Unpublished report for Beech Ridge Energy, LLC. Prepared by WEST, Inc., Waterbury, VT. Retrieved 28 December 2015 from http://www.batsandwind.org/pdf/Thidar%20et%20al.%202013.%20Beech%20Ridge%202012%20Post-construction%20Monitoring%20Final%20Report_1_18_13.pdf

Vanpeene, S. (2018). Analyse de la thèse «Écologie du mouvement des chauves-souris à l'échelle locale et risques de collision anthropogéniques», Roemer, 2018, Montpellier.

Verboom, B. & Huitema, H. (1997). The importance of linear landscape elements for the pipistrelle *Pipistrellus pipistrellus* and the serotine bat *Eptesicus serotinus*. *Landscape Ecology* 12: 117-125.

Vivre Ici (2020). Une dixième éolienne sera installée à Mesnil-Saint-Blaise l'année prochaine. Article publié le 20 août 2020. Consulté le 13/08 à l'adresse : http://www.vivreici.be/article/detail_une-dixieme-eolienne-sera-installee-a-mesnil-saint-blaise-l-39-annee-prochaine?id=447567

Voigt, C. C., Lehnert, L.S., Petersons, G., Adorf, F. & Bach, L. (2015). Wildlife and renewable energy: German politics cross migratory bats. *European Journal of Wildlife Research* 61: 213-219.

Voigt, C. C., Popa-Lisseanu, A.G., Niermann, I. & Kramer-Schadt, S. (2012). The catchment area of wind farms for European bats: a plea for international regulations. *Biological Conservation* 153: 80-86.

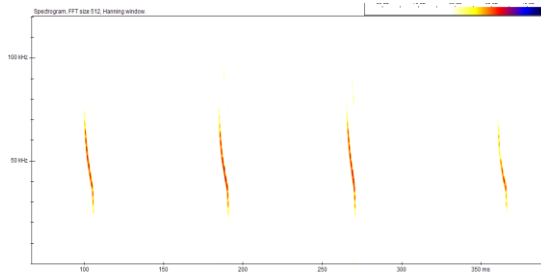
Voigt, C. C., Russo, D., Runkel, V., & Goerlitz, H. R. (2021). Limitations of acoustic monitoring at wind turbines to evaluate fatality risk of bats. *Mammal Review*.

Wilkinson, G. S., & South, J. M. (2002). Life history, ecology and longevity in bats. *Aging cell*, 1(2), 124-131.

Zimmerling, J.R., Pomeroy, A.C., d'Entremont, M.V. & Francis, C.M. (2013). Canadian estimate of bird mortality due to collisions and direct habitat loss associated with wind turbine developments. *Avian Conservation and Ecology* 8: 10.

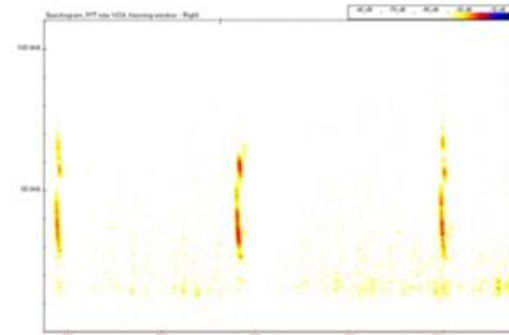
Annexes

Annexe I : Exemples de sonogrammes d'espèces belges



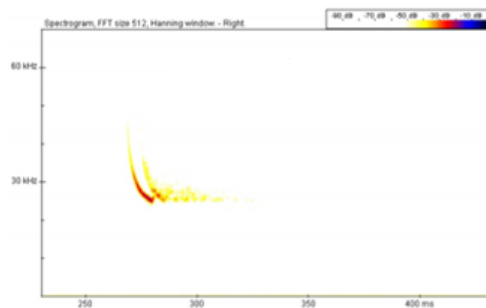
Murins (*Myotis* sp.)

FM



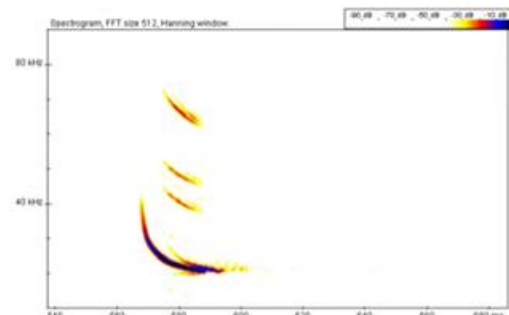
Oreillard roux (*P. auritus*)

FM



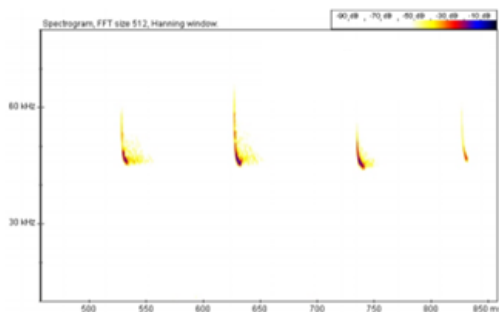
Sérotine commune (*E. serotinus*)

FMQC



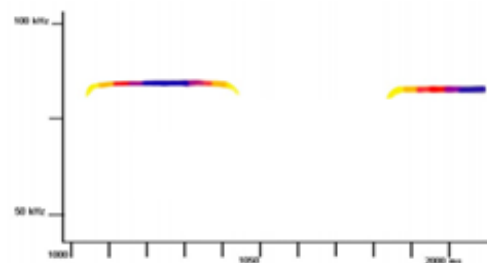
Noctule commune (*N. noctula*)

FMQC



Pipistrelle commune (*P. pipistrellus*)

FMQC

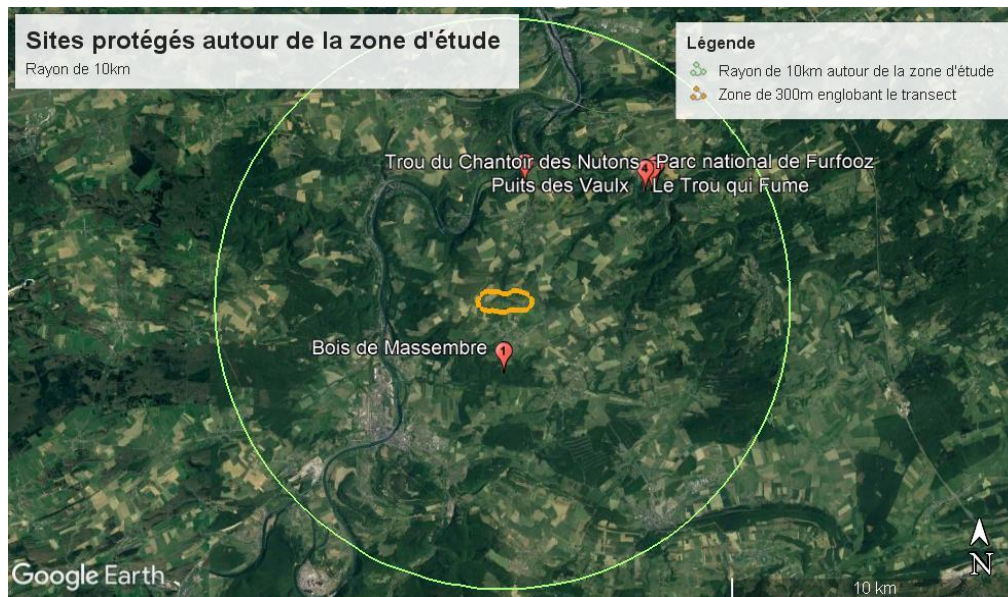


Grand Rhinolophe (*R. ferrumequinum*)

FC

Dans le cadre de cette étude, toutes ces espèces ont pu être enregistrées, à l'exception de *Plecotus auritus*.

Annexe II : Sites d'intérêt biologique autour de la zone d'étude



N.B. La figure ci-dessous ne représente pas exhaustivement toutes les zones protégées dans les alentours du site de l'étude.

Nom du site	Statut	Espèces rencontrées ²²
Parc naturel de Furfooz ²³	SGIB	Petit Rhinolophe (<i>Rhinolophus hipposideros</i>)
Le trou qui fume	SGIB	Petit Rhinolophe (<i>Rhinolophus hipposideros</i>) Grand Rhinolophe (<i>Rhinolophus ferrumequinum</i>) Murin à moustaches (<i>Myotis mystacinus</i>) Murin des marais (<i>Myotis dasycneme</i>)
Puits des Vaulx	SGIB	Petit Rhinolophe (<i>Rhinolophus hipposideros</i>) Grand Rhinolophe (<i>Rhinolophus ferrumequinum</i>) Grand Murin (<i>Myotis myotis</i>)
Ravin du Colébi	SGIB	Grand Rhinolophe (<i>Rhinolophus ferrumequinum</i>) Grand Murin (<i>Myotis myotis</i>)
Trou du Chantoir des Nutons	SGIB	Petit Rhinolophe (<i>Rhinolophus hipposideros</i>) Grand Rhinolophe (<i>Rhinolophus ferrumequinum</i>) Murin à moustaches (<i>Myotis mystacinus</i>)
Bois de Massembre	SGIB	Pipistrelle de Nathusius (<i>Pipistrellus nathusii</i>) Noctule commune (<i>Nyctalus noctula</i>) Noctule de Leisler (<i>Nyctalus leisleri</i>)

²² Ces informations sont issues du site : http://biodiversite.wallonie.be/fr/rechercher-un-site-interessant-ou-protege.html?IDC=2828&TYPE_SGIB=sgib

²³ Il s'agit bien d'un parc naturel et pas d'un parc national comme écrit sur la figure de Google Earth.

Annexe III : Fiches de terrain

Annexe IIIa : Inventaire des différents micro-habitats présents au sein des habitats, et distinction des paramètres fixes et variables de ceux-ci

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ					
HAB	Voie de circulation					éolienne			culture																								Eléments naturels										Anthropisme				
	type	relief	accotement	éléments	graminée				fourragère (trèfle)				colza				Prairies				haies			arbre			hydrologie				hangar	Commentaires															
	chemin	plat	butte		herbeux	fleuri	parking	mât	pales	labour	semis	feuilles	tige	épis	labour	semis	feuilles	fleurs	labour	semis	feuilles	tige	fleurs	rotation	nente int	nente ext	de fauche	floraison	simple	mixte			floraison	isolé	alignement	bosquet	mixte	floraison	ru	ruisseau	zone humide	étang	flaque				
1		1	1	0		0	1	1	1	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	VAR	1	1	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2		1	1	0	VAR	VAR	0	0	0	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	VAR	1	1	VAR	0	1	0	0	0	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3		1	1	0	VAR	VAR	0	0	0	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	VAR	1	1	VAR	1	0	0	0	0	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4		0	0	0		0	0	0	0	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	VAR	1	0	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5		0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	VAR	0	0		0	0	0	1	1	VAR	0	1	1	0	0	0	0	0	0		
6		0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	VAR	0	0		0	0	0	0	1	1	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0		
7		0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	VAR	0	0		0	0	0	0	1	1	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0		
8		0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	VAR	0	0		0	0	0	0	1	1	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0		
9		0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	VAR	1	0	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10		1	1	0	VAR	VAR	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	VAR	1	1	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11		1	1	0	VAR	VAR	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	VAR	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12		1	1	0	VAR	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	VAR	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13		1	1	0	VAR	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	VAR	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14		1	1	0	VAR	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	VAR	1	0	VAR	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
15		0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	VAR	0	0		0	1	0	1	1	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
16		0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	VAR	1	1	VAR	0	1	0	0	0	VAR	1	1	1	1	1	1	0	0	0		
17		0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	VAR	0	0		0	0	0	0	1	1	VAR	0	1	0	0	0	0	0	0		
18		0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	VAR	0	0		0	1	0	1	1	VAR	0	1	1	1	1	0	0	0	0		
19		0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	1	1	VAR	0	1	1	1	0	0	0	0		
20		0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	VAR	1	1	VAR	0	0	1	1	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
21		0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	VAR	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
22		1	1	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	VAR	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
23		1	1	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
24		1	1	0	VAR	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25		1	1	0	VAR	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	VAR	1	1	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26		1	1	0	VAR	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	VAR	1	1	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27		1	1	1	VAR	VAR	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	VAR	1	1	VAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

HAB = zone autour du point d'écoute (20m de rayon) ; VAR = paramètre variable ; 0 = absence ; 1 = présence

Annexe IIIb : Horaire à respecter pour les enregistrements (exemple du 13 avril 2021)

Le premier enregistrement doit démarrer à l'heure du crépuscule civil (21h06). En comptant 2 minutes d'enregistrement continu et 3 minutes pour passer d'un point à l'autre, le transect est parcouru en 2h12. Ceci permet d'englober au mieux la période d'activité des chauves-souris qui s'étend de 1h30 à 2h après le coucher du soleil.

Point	Start	End
1	21:06:00	21:08:00
2	21:11:00	21:13:00
3	21:16:00	21:18:00
4	21:21:00	21:23:00
5	21:26:00	21:28:00
6	21:31:00	21:33:00
7	21:36:00	21:38:00
8	21:41:00	21:43:00
9	21:46:00	21:48:00
10	21:51:00	21:53:00
11	21:56:00	21:58:00
12	22:01:00	22:03:00
13	22:06:00	22:08:00
14	22:11:00	22:13:00

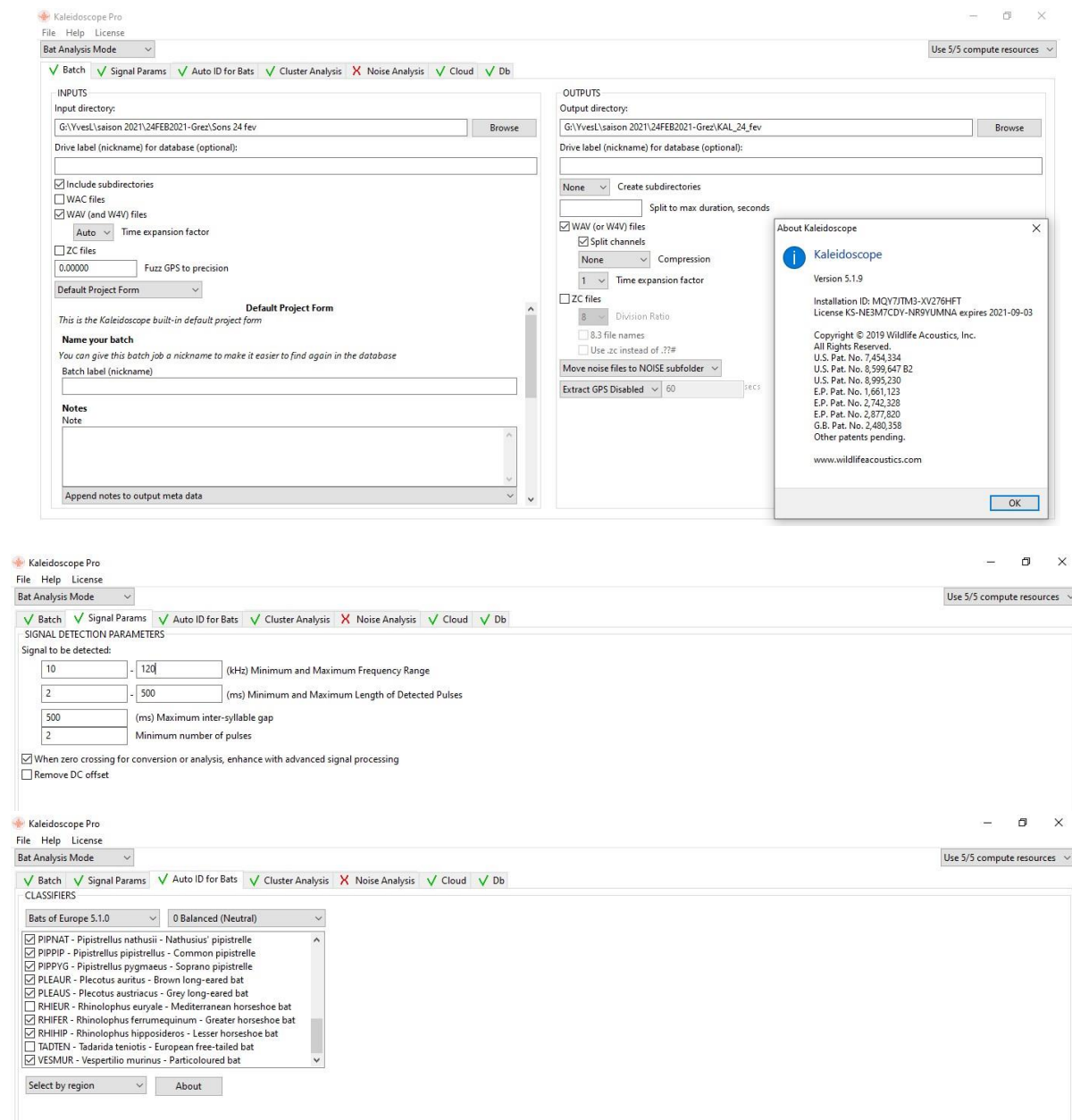
Point	Start	End
15	22:16:00	22:18:00
16	22:21:00	22:23:00
17	22:26:00	22:28:00
18	22:31:00	22:33:00
19	22:36:00	22:38:00
20	22:41:00	22:43:00
21	22:46:00	22:48:00
22	22:51:00	22:53:00
23	22:56:00	22:58:00
24	23:01:00	23:03:00
25	23:06:00	23:08:00
26	23:11:00	23:13:00
27	23:16:00	23:18:00

Annexe IIIc : Fiche météo (exemple du 4 avril 2021)

HAB	Météo										
	°C	m/s	rose	%	hPa	Précipitation			Couvert nuageux		
	T°	Vitesse	Direction	Hygro	Pression	Bruine	Pluie	Forte pluie	Etoilé/dégagé	Eclairci	Couvert
1	5.2	2	WNN	77	987	0	0	0	1	0	0
2	5	2	NW	79	987	0	0	0	1	0	0
3	5	2	WNN	78	987	0	0	0	1	0	0
4	4.4	0.9	WNN	81	987	0	0	0	1	0	0
5	4.4	0	WNN	81	987	0	0	0	1	0	0
6	3.9	0.2	WNN	82	989	0	0	0	1	0	0
7	3.6	0.4	WNN	82	989	0	0	0	1	0	0
8	4.2	0.8	WNN	81	989	0	0	0	1	0	0
9	3.9	0.8	WNN	80	988	0	0	0	1	0	0
10	4.8	1.1	WNN	77	988	0	0	0	1	0	0
11	4.9	1.4	WNN	77	988	0	0	0	1	0	0
12	4.5	1	WNN	78	988	0	0	0	1	0	0
13	4.6	0.8	WNN	78	988	0	0	0	1	0	0
14	4	0.8	WNN	80	988	0	0	0	1	0	0
15	3.1	0	WNN	79	989	0	0	0	1	0	0
16	1.8	0	WNN	82	989	0	0	0	1	0	0
17	1.6	0	WNN	83	989	0	0	0	1	0	0
18	1.2	0	WNN	84	989	0	0	0	1	0	0
19	0.8	0	WNN	85	989	0	0	0	1	0	0
20	1.8	0	WNN	90	989	0	0	0	1	0	0
21	2.1	0	WNN	87	989	0	0	0	1	0	0
22	2.6	0	WNN	85	988	0	0	0	1	0	0
23	3.4	0.8	WNN	83	988	0	0	0	1	0	0
24	3.6	0.8	WNN	82	987	0	0	0	1	0	0
25	3.4	0.2	WNN	82	987	0	0	0	1	0	0
26	3.4	0.2	WNN	82	987	0	0	0	1	0	0
27	2.9	0.2	WNN	81	987	0	0	0	1	0	0

Annexe IV : Paramètres des logiciels utilisés

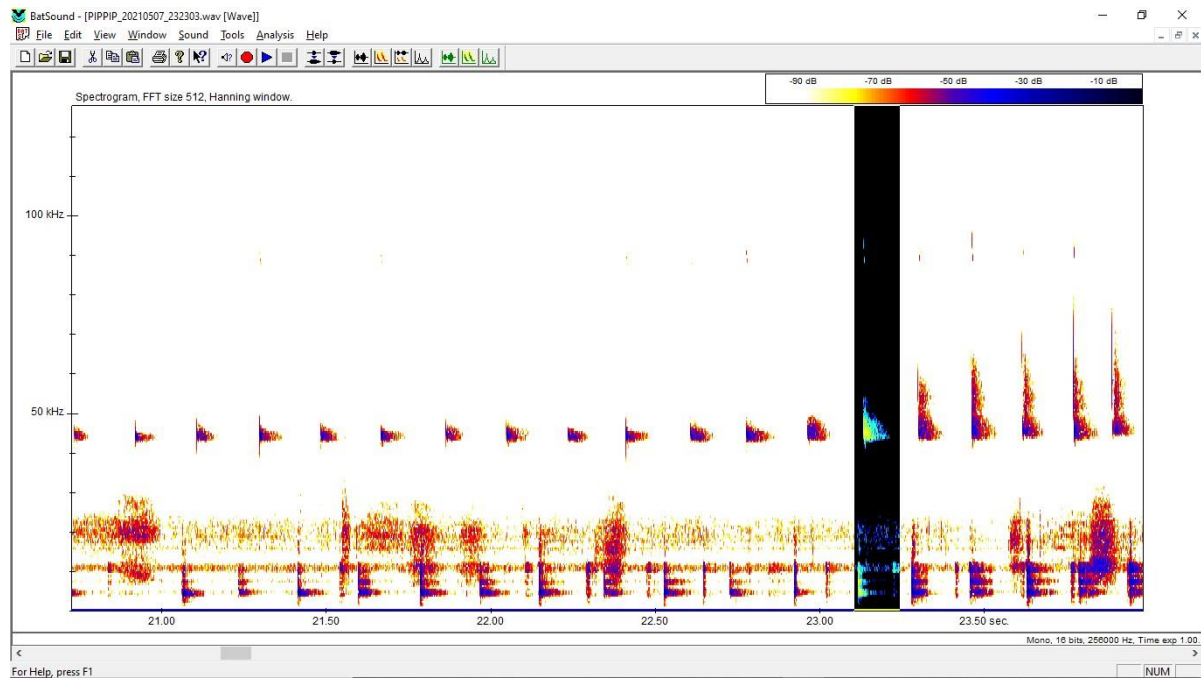
Annexe IVa : Paramètres fixés pour Kaleidoscope



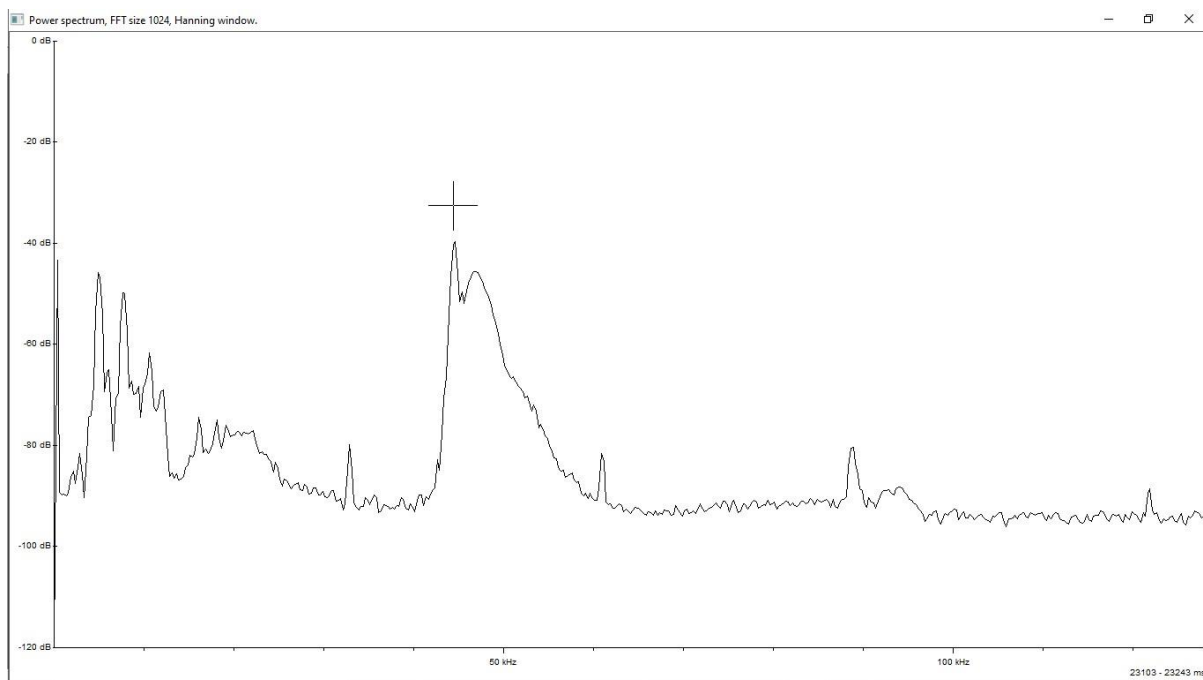
Les onglets à partir de "Cluster" = *disabled* (non sélectionnés)

Annexe IVb : Exemple d'un sonogramme, d'un spectre de puissance et d'un oscillogramme sur Batsound

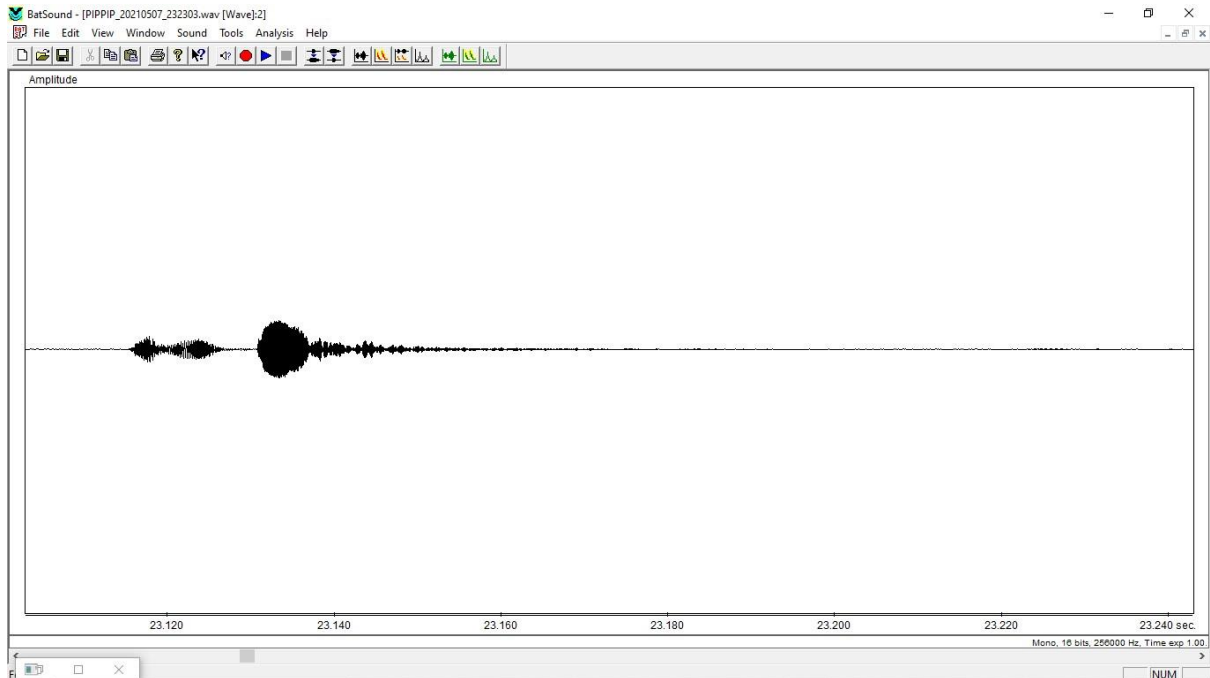
Les images ci-dessous sont issues des données de cette étude. Il s'agit de cris de *P. pipistrellus* enregistrés le 07/05 à 23h23.



Sonogramme : y = fréquences (kHz), x = temps (sec.)

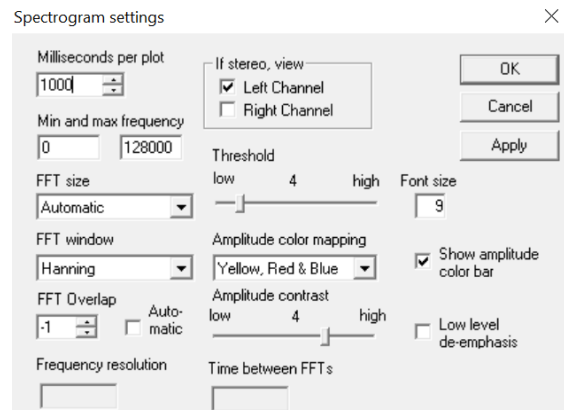
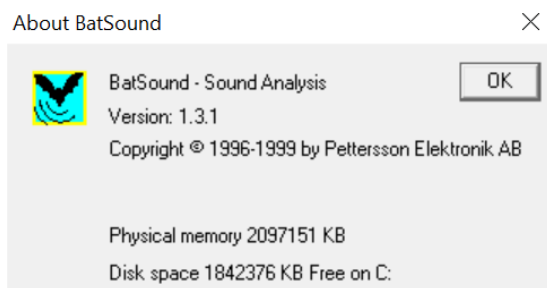


Spectre de puissance : y = intensité (dB), x = fréquences (kHz)



Oscillogramme : y = amplitude, x = temps (sec.)

Annexe IVc : Paramètres choisis pour BatSound



Annexe V : Base de données pour les analyses

Annexe Va : Aperçu de la base de données importée dans le logiciel RStudio

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	fichier	esp	groupe.esp	passage	chasse	cri.social	multi.ind	date	heure	crepuscule.ci	t.post.crepus	duree	HAB	temperature	vitesse	direction.ven
215	PIPPIP_20210417_215303.wav	PIPPIP	PIPGR	1	1	1	1	21-04-17	21:53:03	21:13:00	00:40:03	2403	HAB 19	7.7		0 N
216	PIPPIP_20210417_215303.wav	PIPPIP	PIPGR	1	1	1	1	21-04-17	21:53:03	21:13:00	00:40:03	2403	HAB 19	7.7		0 N
217	PIPPIP_20210417_215802.wav	PIPPIP	PIPGR	1	1	0	0	21-04-17	21:58:02	21:13:00	00:45:02	2702	HAB 18	7.1		0 N
218	NoID_20210417_220302.wav	NONE	NONE	0	0	0	0	21-04-17	22:03:02	21:13:00	00:50:02	3002	HAB 17	6.6		0 N
219	NoID_20210417_220803.wav	PIPPIP	PIPGR	1	0	1	0	21-04-17	22:08:03	21:13:00	00:55:03	3303	HAB 16		6	0 N
220	NoID_20210417_220803.wav	NOSP	MYOGR	1	0	0	0	21-04-17	22:08:03	21:13:00	00:55:03	3303	HAB 16		6	0 N
221	PIPPIP_20210417_221304.wav	PIPPIP	PIPGR	1	0	0	0	21-04-17	22:13:04	21:13:00	01:00:04	3604	HAB 15	6.2		0 N
222	NoID_20210417_221801.wav	NONE	NONE	0	0	0	0	21-04-17	22:18:01	21:13:00	01:05:01	3901	HAB 14	6.1	0.2	N

NONE = aucune chauve-souris détectée

	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG
1	humidite	pression.atm	pluie	degage	eclairci	couvert	chemin.plat	acc.herbeux	acc.fleuri	eolienne	gr.feuilles.tig	gr.epis	fou.feuilles	fou.fleurs	col.feuilles.tig	col.fleurs	prairie.perm.
215	66	989	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
216	66	989	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
217	69	992	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
218	67	992	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
219	67	992	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
220	67	992	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
221	65	991	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
222	65	991	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1

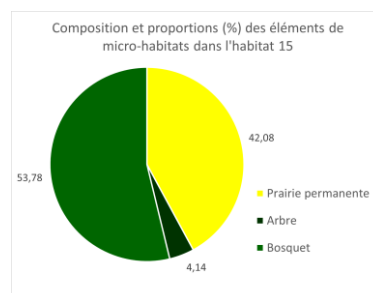
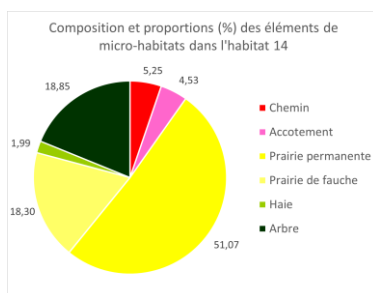
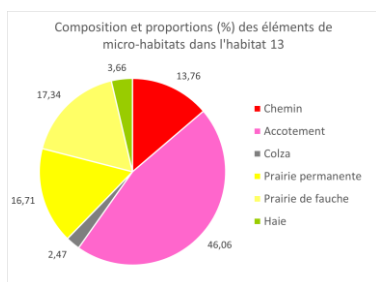
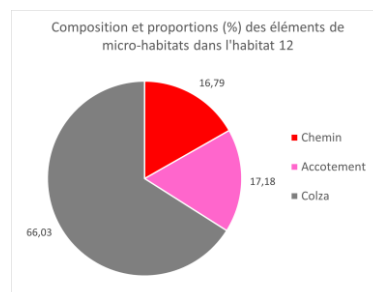
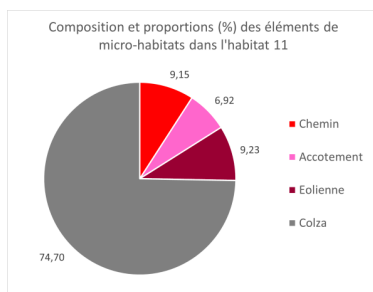
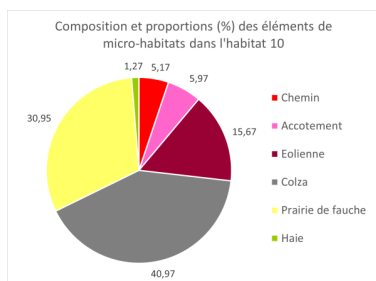
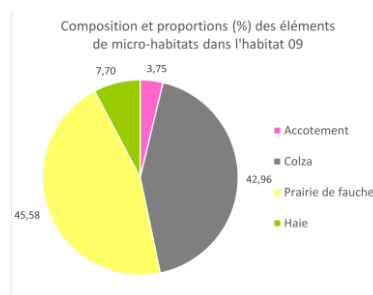
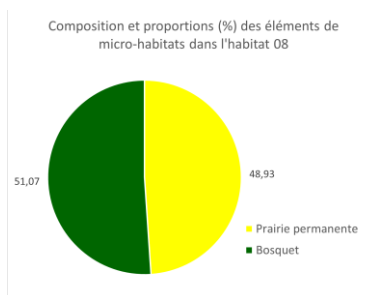
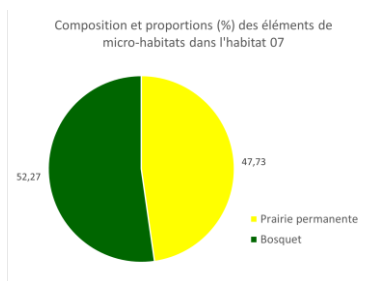
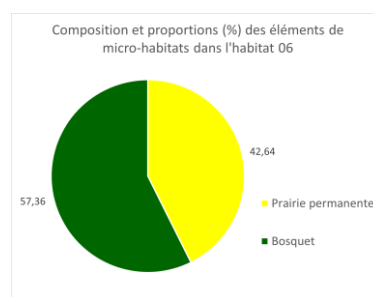
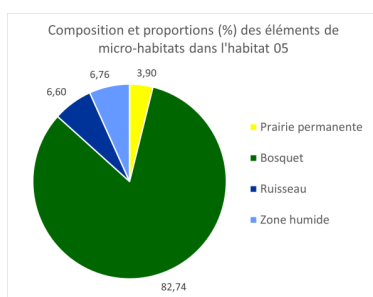
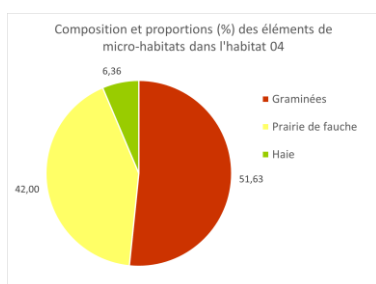
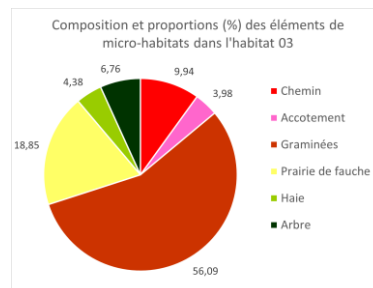
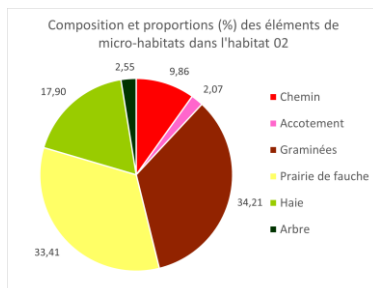
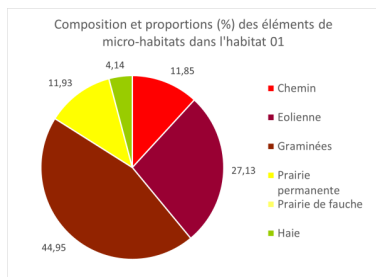
	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP
1	prairie.de.fau	haie.simple.n	haie.floraison	arbre.isole	bosquet	arbre.floraison	ruisseau	zone.humide	etang
215	0	0	0	0	1	0	1	1	0
216	0	0	0	0	1	0	1	1	0
217	0	0	0	1	1	0	1	1	0
218	0	0	0	0	1	0	1	0	0
219	0	1	1	0	0	0	1	1	1
220	0	1	1	0	0	0	1	1	1
221	0	0	0	1	1	1	0	0	0
222	0	1	0	1	0	0	0	0	0

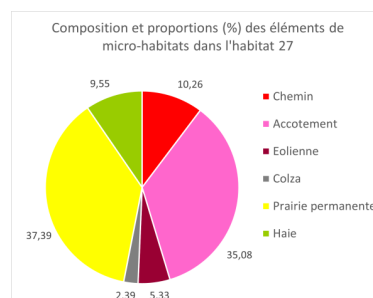
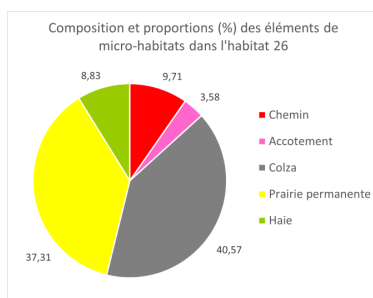
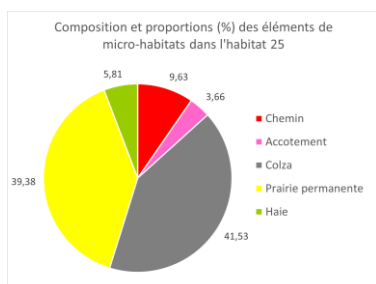
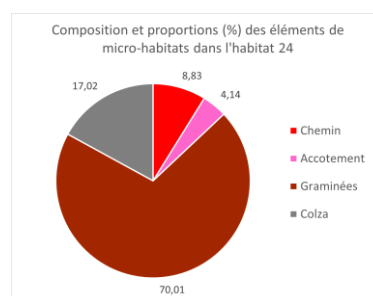
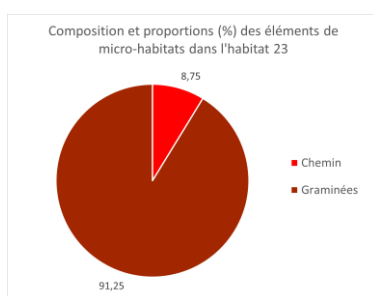
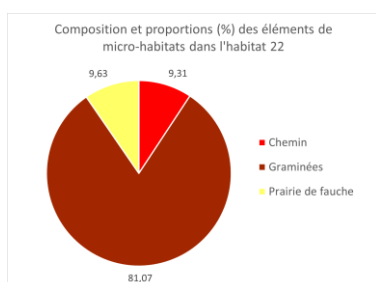
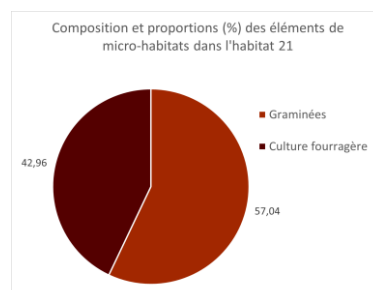
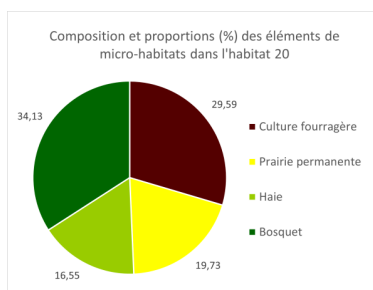
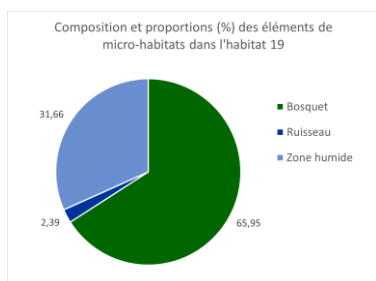
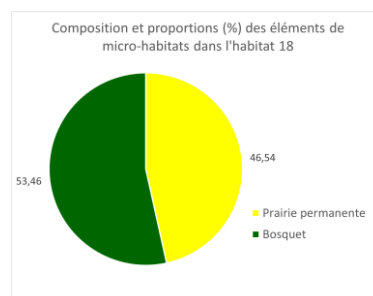
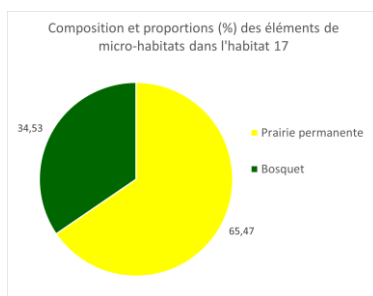
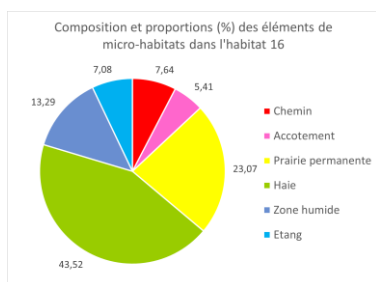
Annexe Vb : Contenu de la base de données - Types de variables

Variables dépendantes	Groupes d'espèce	Catégorielle
	Espèces	Catégorielle
	Comportement de chasse	Binaire
Variables indépendantes/explicatives météorologiques	Température	Continue
	Vitesse du vent	Continue
	Pression atmosphérique	Continue
	Humidité	Continue
	Pluie	Binaire
Variables indépendantes/explicatives environnementales	Habitats (HAB)	Catégorielle
	Accotement	Binaire
	Eolienne	Binaire
	Graminées	Binaire
	Fourrage	Binaire
	Colza	Binaire
	Prairie permanente extensive	Binaire
	Prairie de fauche	Binaire
	Haies	Binaire
	Arbre isolé	Binaire
	Bosquet	Binaire
	Ruisseau	Binaire

	Etang	Binaire
--	-------	---------

Annexe VI : Proportions des micro-habitats dans chaque habitat





Annexe VI' : Graphiques réalisés mais non exploités dans le manuscrit

