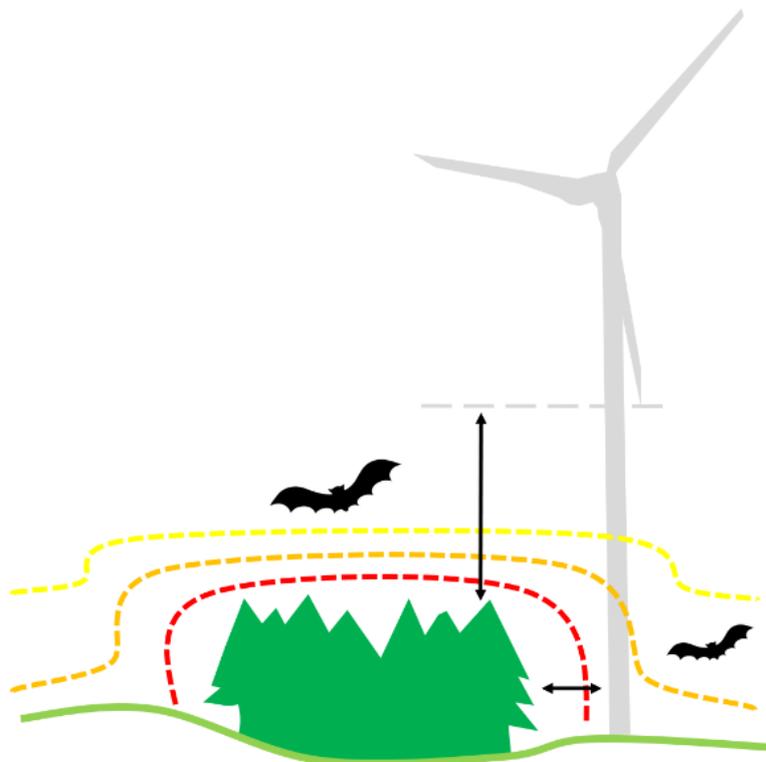


**MARCHÉ PUBLIC DE SERVICES VISANT À ÉTUDIER
L'ACTIVITÉ ET LA MORTALITÉ DES CHAUVES-SOURIS SUR
DES PARCS ÉOLIENS FORESTIERS EN WALLONIE**

**LOT 4 - ANALYSE DE RISQUES PAR RAPPORT À LA
DIMINUTION DE LA DISTANCE ENTRE LE MÂT ET LES
LISIÈRES, D'UNE PART, ET LA DISTANCE ENTRE LE BAS
DE PALES ET LA VÉGÉTATION (HERBACÉE OU
LIGNEUSE), D'AUTRE PART**

Rapport final



Colophon

Étude et rapport réalisés par

CSD Ingénieurs Conseils S.A.

BE 0432.892.291

www.csdingenieurs.be

Adresse postale : Avenue Prince de Liège 72 - 5100 Namur

Administrateur responsable : Jean-Christophe Genis jc.genis@csdingenieurs.be

Personnes de contact pour ce dossier :

Louis Casier 0472 95 23 09 l.casier@csdingenieurs.be

Arnaud Beckers 0498 05 14 86 a.beckers@csdingenieurs.be

Julien Otoul 0492 76 20 65 j.otoul@csdingenieurs.be



en collaboration avec

Ecofirst SC

Société coopérative

BE 0692.806.959

www.ecofirst.eu

Adresse postale : Grand-Rue 12 - 6870 Awenne

Administrateur responsable : Gérard Jadoul gerard.jadoul@ecofirst.eu

Personnes de contact pour ce dossier :

Pierrette Nyssen 0473 265 264 pierrette.nyssen@ecofirst.eu

et Jean-François Godeau 0472 94 48 47 jf.godeau@ecofirst.eu



pour le compte de

Service Public de Wallonie (SPW)

Agriculture, Ressources Naturelles et Environnement (ARNE)

Département de l'Etude du Milieu Naturel et Agricole (DEMNA)

Direction de la Nature et de l'Eau (DNE)

Adresse postale : Avenue Maréchal Juin, 23 à 5030 GEMBLOUX

Pouvoir adjudicateur : Bénédicte Heindrichs, Directrice générale du SPWARNE

Fonctionnaire dirigeant : Annick Terneus annick.terneus@spw.wallonie.be

Personne de contact pour ce dossier :

Thierry Kervyn 0477 26 03 99 thierry.kervyn@spw.wallonie.be



dans le cadre du

marché public de services visant à étudier l'activité et la mortalité des chauves-souris sur des parcs éoliens forestiers en Wallonie - Cahier spécial des charges n°03.02.03-22-3285

et en particulier son LOT 4 intitulé " Analyse de risques par rapport à la diminution de la distance entre le mât et les lisières, d'une part, et la distance entre le bas de pales et la végétation (herbacée ou ligneuse), d'autre part "

Composition du comité d'accompagnement :

- SPWARNE – DEMNA : Thierry Kervyn, Quentin Smits, Annick Terneus, Jérémy Simar
- SPWARNE – DNF : Jean-Philippe Bizoux, Corentin Laroy
- ECOFIRST : Jean-François Godeau, Pierrette Nyssen
- CSD-Ingénieurs : Arnaud Beckers, Louis Casier

Rédaction et mise en page : Louis Casier, Arnaud Beckers

Analyse bibliographique : Pierrette Nyssen, Jean-François Godeau, Louis Casier, Arnaud Beckers

Relecture : Julien Otoul, Pierrette Nyssen

Date de finalisation du rapport : 10/12/2023

Référence : Casier, L., Nyssen, P., Godeau J.-F. & Beckers, A., Activité et mortalité des chauves-souris sur des parcs éoliens forestiers en Wallonie : Analyse de risques par rapport à la diminution de la distance entre le mât et les lisières, d'une part, et la distance entre le bas de pales et la végétation (herbacée ou ligneuse), d'autre part, Rapport final, Décembre 2023, CSD Ingénieurs et Ecofirst.

Table des matières

1	Introduction	6
2	Analyse bibliographie	8
2.1	Activité des chauves-souris au niveau du sol	8
2.2	Activité des chauves-souris à hauteur des rotors	9
2.3	Mortalité.....	14
3	Analyse des données relatives aux points d'écoute	15
3.1	Méthode	15
3.2	Résultats	18
4	Analyse des données relatives aux inventaires en continu	23
4.1	Méthode	23
4.2	Présentation des données	27
4.3	Résultats de l'analyse statistique	28
5	Discussion	39
5.1	Résultats et limites de l'analyse des points d'écoute	39
5.2	Résultats et limites de l'analyse des inventaires en continu	40
5.3	Analyse de risques par rapport à la diminution de la distance entre le mât et les lisières	41
6	Conclusions, recommandations et perspectives	46
7	Bibliographie	47

Préambule

CSD confirme par la présente avoir exécuté son mandat avec la diligence requise. Les résultats et conclusions sont basés sur l'état actuel des connaissances tel qu'exposé dans le rapport et ont été obtenus conformément aux règles reconnues de la branche.

CSD se fonde sur les prémisses que :

- le mandant ou les tiers désignés par lui ont fourni des informations et des documents exacts et complets en vue de l'exécution du mandat,
- les résultats de son travail ne seront pas utilisés de manière partielle,
- sans avoir été réexaminés, les résultats de son travail ne seront pas utilisés pour un but autre que celui convenu ou pour un autre objet ni transposés à des circonstances modifiées.

Dans la mesure où ces conditions ne seraient pas remplies, CSD déclinera toute responsabilité envers le mandant pour les dommages qui pourraient en résulter.

1 Introduction

Le consortium formé par CSD Ingénieurs et Ecofirst a été mandaté par le Service Public de Wallonie pour la réalisation du lot n°4 d'un marché public de services visant à étudier l'activité et la mortalité des chauves-souris sur des parcs éoliens forestiers en Wallonie (cahier spécial des charges n°O3.02.03-22-3285). Le sujet du lot n°4 est l'« Analyse de risques par rapport à la diminution de la distance entre le mât [d'une éolienne] et les lisières, d'une part, et la distance entre le bas de pales et la végétation (herbacée ou ligneuse), d'autre part ».

Il est attendu que le risque de mortalité des chauves-souris par collision/barotraumatisme avec les pales d'éoliennes augmente significativement lorsque l'on s'approche des forêts, qui sont des zones de chasse privilégiées pour beaucoup d'espèces. La question de la distance aux lisières forestières, qu'elles soient verticales en bordure d'un milieu ouvert, ou horizontales, au-dessus de la canopée, représente donc une préoccupation importante dans le cadre du développement de la production électrique d'origine éolienne à proximité des bois et forêts. A l'échelle européenne, EUROBATS recommande de maintenir une distance de 200 m aux forêts (Rodrigues et al. 2014). En Wallonie, le département de la Nature et des Forêts (DNF) recommande actuellement une distance minimale de 100 m entre le mat d'une éolienne et la lisière la plus proche. Il recommande également d'éviter l'implantation d'éoliennes dans les forêts wallonne, sauf exceptionnellement dans des forêts résineuses de « faible intérêt biologique ». Concernant la distance de garde verticale par rapport à la végétation, EUROBAT ne recommande pas de valeur spécifique, tandis que le DNF recommande actuellement 35 m pour les projets en milieu ouvert et 35-40 m au-dessus de la canopée pour les projets en forêt.

Les objectifs du marché tels que précisés dans le cahier spécial des charges sont les suivants :

- *Fournir une analyse de la littérature scientifique traitant de la distance entre le mât et les lisières, d'une part, et la distance entre le bas de pales et la végétation (herbacée ou ligneuse), d'autre part ;*
- *Fournir une méta-analyse des résultats des points d'écoute des EIE de projets éoliens des cinq dernières années (env. 20 EIE).*

En plus de ces deux points, nous avons jugé pertinent d'inclure une analyse de données d'enregistrements en continu sur des mats de mesures, pour explorer à la fois l'effet de la distance horizontale mais aussi celui de la distance verticale à la végétation sur base de données enregistrées en Wallonie.

Concernant les données utilisées dans le cadre de ce marché, les données acoustiques des inventaires chiroptérologiques réalisés entre 2015 et 2022 dans le cadre de 32 études d'incidences ont été compilées. Il s'agit d'inventaires ponctuels au sol ainsi que d'inventaires en continu au sol et « en altitude » sur des mats de mesure. Concernant les inventaires ponctuels au sol, les données provenant de points d'écoutes d'une durée de cinq minutes ont été utilisées afin de mesurer la relation entre l'activité chiroptérologique et la distance horizontale à la lisière forestière la plus proche. D'autres variables paysagères ont également été prises en compte afin d'évaluer l'influence relative de la proximité des lisières par rapport à d'autres variables environnementales. Concernant les inventaires en continu, les données provenant d'enregistrements au sol et en altitude d'avril à octobre ont été utilisées afin d'établir une relation entre l'activité chiroptérologique et la distance horizontale, verticale et diagonale à la canopée la plus proche.

La répartition spatiale des inventaires chiroptérologiques utilisés dans le cadre de cette étude est détaillée à la figure suivante.

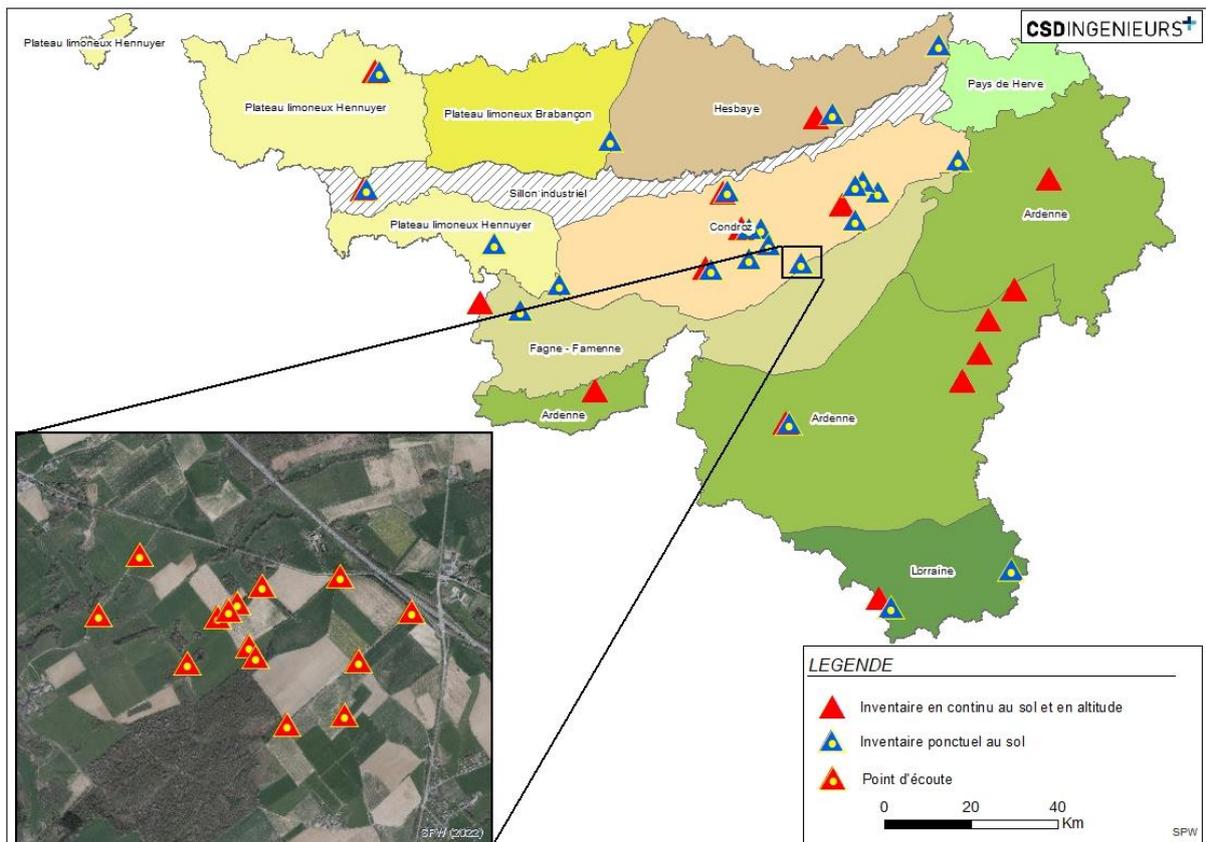


Figure 1: Localisation des inventaires chiroptérologiques utilisés dans le cadre de cette étude. Un point « inventaire ponctuel au sol » regroupe un ensemble des points d'écoutes répartis sur un site d'étude, comme illustré par l'encart.

Au total, les données chiroptérologiques provenant de 199 points d'écoutes et de 16 mâts de mesures qui ont ainsi été extraites de la base de données de CSD Ingénieurs. Ces inventaires offrent une couverture assez complète de la Wallonie, comme illustré à la figure précédente. L'analyse des enregistrements en continu concerne cependant un nombre limité de sites (16). Pour cette raison, nous nous sommes limités à une analyse des effets de distances au sol et aux forêts, sans considérer d'autres variables explicatives potentielles comme la présence de haies, la proportion de forêts dans le paysage, la présence de plans d'eau, etc. Pour élaborer la stratégie d'analyse statistique des données, nous nous sommes notamment basés sur plusieurs publications récentes dans le même domaine (Barré et al. 2018; Ellerbrok et al. 2022; Gaultier et al. 2023; Leroux et al. 2022).

Le rapport est structuré de la manière suivante :

- Synthèse bibliographique ;
- Analyse des données relatives aux points d'écoute ;
- Analyse des données relatives aux inventaires en continu ;
- Discussion (y compris l'analyse de risque) ;
- Conclusion.

2 Analyse bibliographique

Une revue de la littérature relative à l'effet de la distance entre le mât et les lisières, d'une part, et la distance entre le bas de pales et la végétation (herbacée ou ligneuse), d'autre part sur l'activité et/ou la mortalité des chauves-souris a été réalisée. Cette revue a consisté en une recherche parmi la littérature scientifique ainsi que parmi la littérature dite « grise ». Une base de données bibliographique Zotero rassemblant les références trouvées a été constituée et partagée avec le SPW (membres du comité d'accompagnement de ce marché). Cette base de données comprend les références ainsi que les pdf des articles mais également des notes, tags (mots-clés).

Les études consultées concernent majoritairement les effets de variables environnementales sur l'activité des chauves-souris et traitent des thématiques suivantes :

- Perte d'habitat pour les chauves-souris, en lien avec la distance aux :
 - Lisières ;
 - Haies ;
 - autres habitats : agroécosystèmes ; milieux humides (mares, ...)
- Mortalité causée par les éoliennes ;
- Répulsion et/ou attractivité des turbines en fonction du vent, rotation des pales, période de l'année ;
- Distance turbines-lisières ;
- Taille des turbines : hauteur de mât, envergure des pales ;
- Temporalité : différence de l'effet répulsif au sein des habitats selon la saison (pas/moins d'effet en fin d'été, comportement différent des espèces migratrices en période de migration) ;
- Attractivité des éoliennes (et facteurs qui l'influencent).

En considérant que l'activité mesurée est un indicateur fiable du risque de mortalité (Roemer et al., 2017 ; Brinkmann et al., 2011), ces études fournissent néanmoins un éclairage utile sur le sujet. Une synthèse de chaque référence jugée pertinente est disponible en annexe, les références traitées sont reprises dans la bibliographie (point 7 du présent rapport).

- ▶ *Annexe A - Analyse de la littérature scientifique traitant de la distance entre le mât et les lisières, d'une part, et la distance entre le bas de pales et la végétation (herbacée ou ligneuse), d'autre part*

Les principaux enseignements de ces études au regard des questions posées dans le cadre du présent marché sont résumés ci-dessous.

2.1 Activité des chauves-souris au niveau du sol

Nous avons identifié trois études ayant mesuré l'effet de la distance horizontale à des éléments ligneux sur l'activité des chauves-souris mesurée au niveau du sol (Heim et al. 2018; Kelm et al. 2014; Leroux et al. 2022). Il s'agit principalement de distances aux haies, mais l'effet de la distance aux forêts a été étudié pour la Noctule commune par Heim et al. (2018). Les résultats de ces études sont synthétisés sur la figure suivante, en regroupant les espèces ou groupes d'espèces sur base de leur comportement d'écholocation. Trois groupes ont été définis :

- *Short-range echolocators* : espèces chassant à proximité directe du feuillage, c'est-à-dire les murins, les oreillards, et la barbastelle d'Europe ;
- *Mid-range echolocators* : espèces chassant les insectes dans l'air, de préférence à proximité des éléments ligneux, c'est-à-dire les pipistrelles ;

- **Long-range echolocators** : espèces au sonar puissant chassant régulièrement en plein ciel, c'est-à-dire les noctules et la sérotine commune.

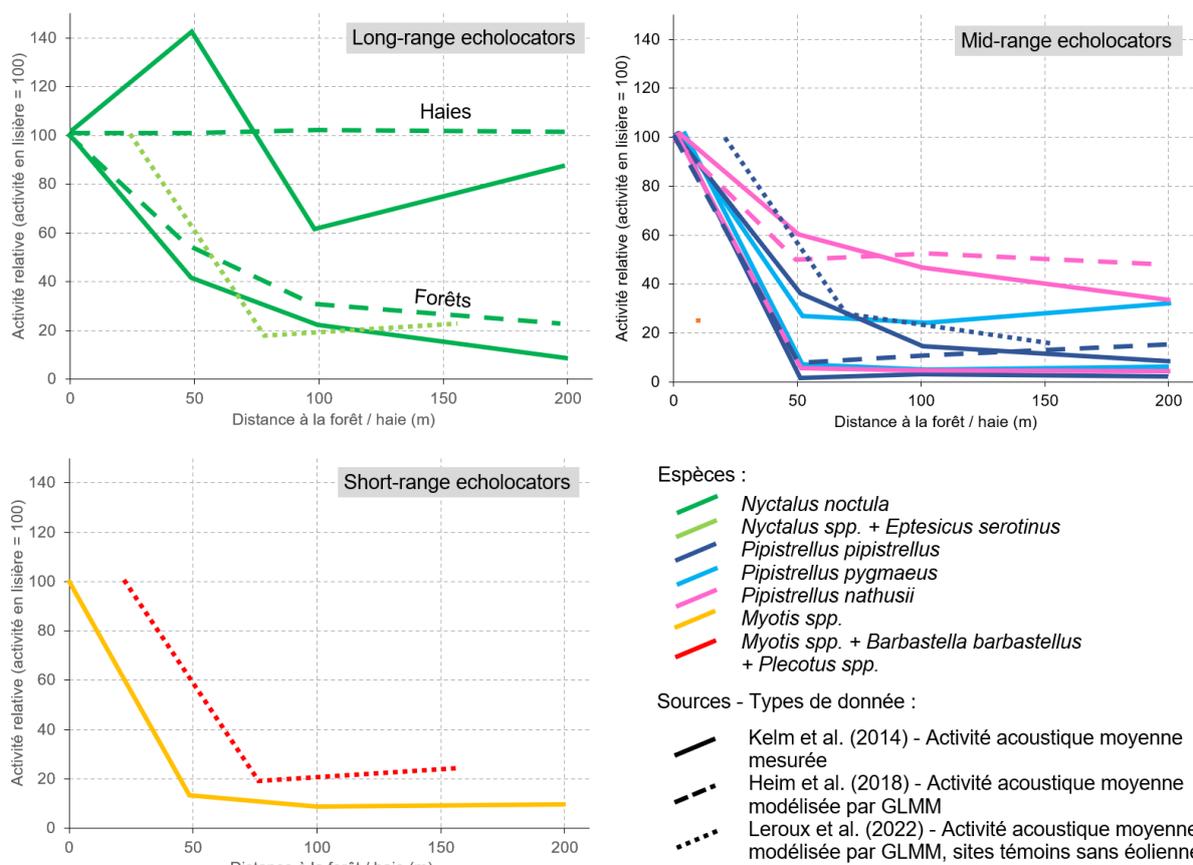


Figure 2: Effet de l'éloignement par rapport à une haie ou une forêt sur l'activité acoustique moyenne des chauves-souris au sol en milieu ouvert. Synthèse des résultats de Kelm et al. (2014), Heim et al. (2018) et (Leroux et al. 2022).

L'effet de la distance aux éléments ligneux est particulièrement net pour les « *mid-range* » et les « *short-range* » echolocators. Pour les premiers (trois espèces de pipistrelles), l'activité au sol diminue de 40 à plus de 90 % entre l'élément ligneux et un point de mesure situé en milieu ouvert éloigné de 50 m. Les taux de décroissance les moins élevés (- 40 % et -50 % à 50 m) concernent la pipistrelle de Nathusius (Kelm et al., 2014 ; Heim et al., 2018). Pour les *short-range echolocators*, l'activité mesurée ou modélisée en un point au sol situé à plus de 50 m de l'élément ligneux est inférieure d'environ 80-90 % à l'activité mesurée au niveau de l'élément ligneux. Pour les *long-range echolocators* par contre, l'effet de la distance aux ligneux semble plus variable, ce qui est tout à fait explicable par l'écologie des espèces de haut vol dont l'activité est nettement moins dépendante des habitats sous-jacents que pour les autres guildes. Ces résultats sont cohérents avec le comportement de chasse des différentes espèces.

2.2 Activité des chauves-souris à hauteur des rotors

2.2.1 Activité mesurée depuis la nacelle d'éoliennes

Concernant l'activité mesurée à hauteur des rotors et l'effet de la distance à la végétation, les résultats des études sont moins précis que ceux concernant l'activité mesurée au sol. Barré et al. (2023) ont étudié les facteurs environnementaux qui permettent d'expliquer l'activité mesurée depuis les nacelles de 59 éoliennes en France, nacelles situées entre 45 et 139 m au-dessus du sol. La distance verticale entre la nacelle et le sol n'est pas un facteur explicatif significatif ni pour le groupe des *long-range* ni pour celui des *short-range echolocators*. Cette variable semble en revanche avoir un léger effet sur l'activité des *mid-range echolocator* (ici les genres *Pipistrellus*, *Hypsugo* et *Miniopterus*). La distance

horizontale à la lisière la plus proche a un effet significatif uniquement sur les *short-range echolocators*. Les mêmes effets, à savoir un effet significatif mais faible de la distance horizontale aux forêts et de la hauteur au-dessus du sol sur l'activité des chauves-souris mesurée depuis la nacelle avaient aussi été notés dans une étude similaire menée en Allemagne dans le cadre du projet RENEBAT (Brinkmann et al. 2011). Nous n'avons pas eu accès à la publication originale de Brinkmann et al. (2011), mais selon un résumé en français rédigé par l'Office franco-allemand pour la transition énergétique, cette étude concernerait des éoliennes dont les nacelles sont situées entre 60 et 100 m au-dessus du sol.

Reers et al. (2017) ont cherché à mettre en évidence une différence d'activité à hauteur de nacelle entre les éoliennes en forêt et celles en milieu agricole. Cette étude a été réalisée en Allemagne sur 130 éoliennes dont la hauteur moyenne au-dessus du sol des nacelles est de 140 m. L'étude ne montre aucune différence significative d'activité entre les éoliennes en forêt et les éoliennes situées en milieu ouvert.

On peut donc en conclure les éléments suivants :

- Dans la couche d'air entre ~45 et ~100 m au-dessus du sol, l'activité des chauves-souris diminue avec la hauteur (Brinkmann et al. 2011), mais uniquement de manière significative pour le groupe des pipistrelles (Barré et al. 2023) ;
- Dans cette même couche d'air, l'effet de la distance aux lisières existe mais est faible (Brinkmann et al. 2011) et ne concernerait que les *short-range echolocators* (Barré et al. 2023), qui sont généralement très peu enregistrés à ces hauteurs ;
- Dans la couche d'air située plus haut, autour de 140 m, il n'y a plus de différence significative d'activité moyenne entre des éoliennes situées en forêt et des éoliennes situées en milieu ouvert (Reers et al. 2017).

2.2.2 Activité mesurée sur des mats de mesure (2 micros)

En utilisant des enregistrements sur 48 mats de mesure de 50 à 100 m de hauteur en France et en Belgique, Roemer et al. (2019) ont montré un effet significatif de la distance horizontale aux forêts sur l'activité au sol et à hauteur du bas des pales de la pipistrelle commune, de la pipistrelle de Kuhl et de la sérotine commune (figure suivante). L'activité de la pipistrelle de Nathusius, de la noctule de Leisler et de la noctule commune n'était pas significativement influencée par ce paramètre, ou l'effet était trop faible en comparaison avec l'effet d'autres variables explicatives. Roemer et al. (2019) précisent cependant que cet effet de la distance aux forêts influence la densité locale des chauves-souris sur un site donné, mais pas la distribution verticale de leur activité. Autrement dit, en moyenne, l'activité mesurée au sol et en hauteur sur les mats était plus élevée près des lisières que sur les mats plus éloignés (figure suivante). Mais le taux de décroissance de l'activité entre les mesures au sol et les mesures en haut des mats n'était pas, en moyenne, influencé par la proximité d'une lisière. Les auteurs déduisent de ce résultat que les chauves-souris ne volent, en moyenne, pas plus haut au-dessus des forêts qu'au-dessus des zones de culture, contrairement à ce qui a pu être affirmé par d'autres études.

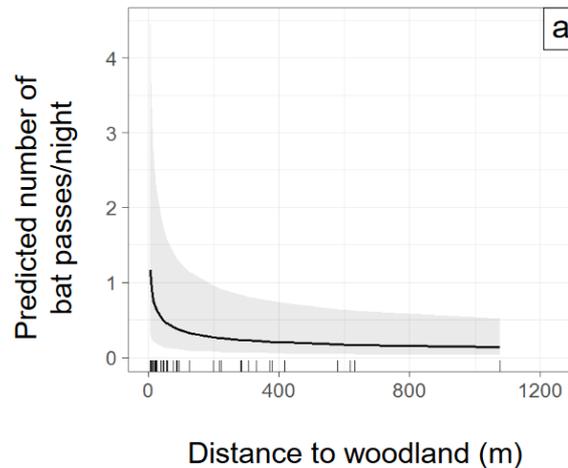


Figure 3 : Effet de l'éloignement à une forêt sur la densité prédite des chauves-souris (toutes espèces confondues, les zones grisées indiquent l'intervalle de confiance à 95 %) mesurée sur des mats de mesures. Source : Roemer et al. (2019).

Ces résultats, qui montrent un effet de la distance aux lisières sur l'activité de la pipistrelle commune, la pipistrelle de Kuhl et la sérotine commune, sont donc légèrement différents des résultats de Barré et al. (2023) dans leur étude de l'activité mesurée en nacelle, qui n'ont détecté un effet significatif que pour les *short-range echolocators*.

2.2.3 Activité mesurée depuis la canopée

L'équipe de Christian Voigt s'est récemment intéressée à l'activité des chauves-souris au niveau des trouées forestières créées pour l'implantation d'éoliennes (Ellerbrok et al. 2023). Leur hypothèse est que bien que les éoliennes en forêt aient un effet d'effarouchement sur certaines espèces (les *short-range echolocators*) (Ellerbrok et al. 2022), les trouées de l'ordre de 1 ha créées pour les implanter pourraient avoir un effet attractif sur d'autres guildes. Ils ont mesuré l'activité des chauves-souris en trois points au sein de 22 trouées dans 22 forêts allemandes : un point au centre de la trouée à 2 m au-dessus du sol, un point sur la lisière au niveau de la canopée et un point à l'intérieur des bois, en canopée, à environ 80 m du centre de la trouée (Ellerbrok et al. 2023). Leurs résultats montrent que l'activité d'écholocation en canopée est significativement plus faible que celle mesurée en lisière ou au milieu de la trouée pour les groupes de *long-range* et des *mid-range echolocators*. L'augmentation dans la trouée et ses lisières est de l'ordre d'un facteur de 1,5 à 2 par rapport à l'activité en canopée. L'effet est moins marqué chez les *short-range echolocators*. La « lisière horizontale » que forme la canopée n'est donc pas, en moyenne, aussi attractive pour les chauves-souris que les « lisières verticale ». Cette étude montre aussi que l'activité dans ces 22 forêts n'est pas influencée significativement par le type de peuplement (feuillu, mixte ou résineux).

2.2.4 Profils verticaux d'activité

Wellig et al. (2018) ont réalisé des enregistrements sur deux grues en Suisse à cinq hauteurs distinctes entre 0 et 65 m. Les deux dispositifs sont localisés dans une grande vallée des Alpes (Rhône) dominée par les cultures. Des versant montagneux culminant à 4.000 m encadrent la vallée de part et d'autre. Bien que ces données ne concernent qu'un site et qu'il faille rester prudent quant à leur utilisation dans des environnements différents, elles fournissent une information détaillée rare sur les profils verticaux d'activité des chauves-souris en Europe (figure suivante).

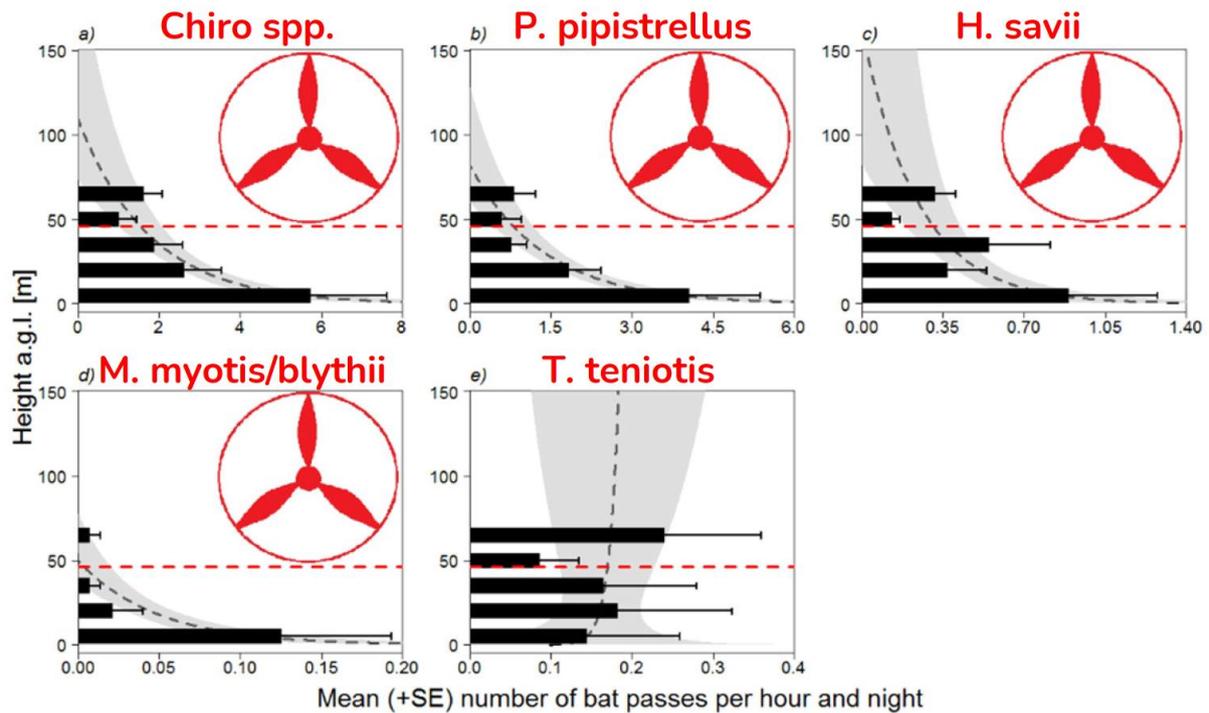


Figure 4: Profils verticaux d'activité des chauves-souris mesurés sur deux sites proches en Suisse (Wellig et al. 2018).

Les données relatives à la pipistrelle commune et au groupe grand murin (*Myotis myotis*) / petit murin (*Myotis blythii*) sont particulièrement intéressantes pour une application à la Wallonie et sont détaillé ci-dessous.

Dans cette étude, l'activité de la plupart des espèces décroît avec l'altitude, mais seule l'activité de la pipistrelle commune décroît significativement avec l'altitude sur base d'un modèle logarithmique ajusté aux observations. La hauteur à partir de laquelle l'activité de cette espèce est théoriquement nulle est difficile à estimer sur une relation asymptotique comme celle-là, mais les auteurs ont calculé que 12 % de l'activité modélisée totale a lieu entre 50 et 150 m au-dessus du sol. Sur base d'une analyse visuelle du graphique, l'activité semble baisser de moitié dès une hauteur d'environ 20 m.

Le modèle logarithmique rend moins bien compte du profil d'activité du groupe grand murin/petit murin. L'activité de ce groupe a majoritairement lieu en dessus de 20 m, et 4 % de l'activité totale modélisée concerne la couche d'air entre 50 et 150 m. Des contacts ont néanmoins été enregistrés au niveau des micros les plus haut, à 65 m.

Concernant les noctules, l'utilisation de balises GPS a permis d'obtenir des données précises sur leur hauteur de vol. Ainsi, Roeleke et al. (2016) ont étudié les déplacements de 5 femelles et 3 mâles de noctules communes entre mai et juillet en Allemagne, à proximité de parcs éoliens. Leurs résultats montrent que les femelles peuvent voler jusqu'à 250 m au-dessus du sol, tandis que les mâles volent plus bas. La hauteur de vol médiane est similaire entre les deux sexes, autour de 40 m (figure suivante).

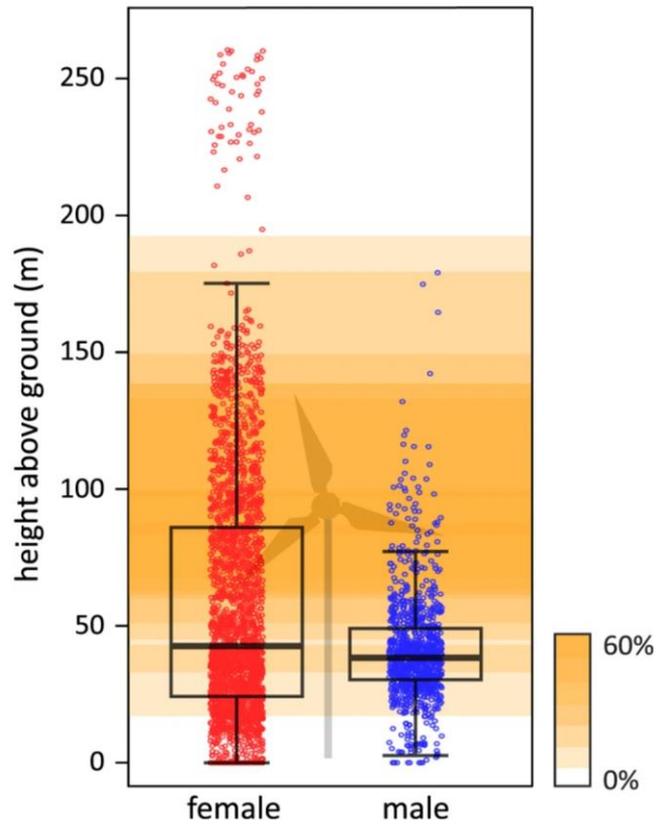


Figure 5 : Répartition verticale des positions GPS de 8 noctules communes en Allemagne entre mai et juillet. Les tons orange en arrière-plan indiquent la densité de pales d'éoliennes dans la région d'étude par tranche de hauteur au-dessus du sol. Les boîtes à moustaches représentent les quartiles des distributions des hauteurs de vol chez les femelles et chez les mâles. Le trait gras indique la hauteur médiane. Source : Roeleke et al. (2016).

Le même exercice a été réalisé en Flandre sur 6 noctules de Leisler (Janssen et al. 2019). Les résultats ont montré que ces individus effectuent des vols nocturnes très longs, dépassant parfois 100 km en une nuit, et qu'ils volent jusqu'à plus d'un kilomètre au-dessus du sol (figure suivante).

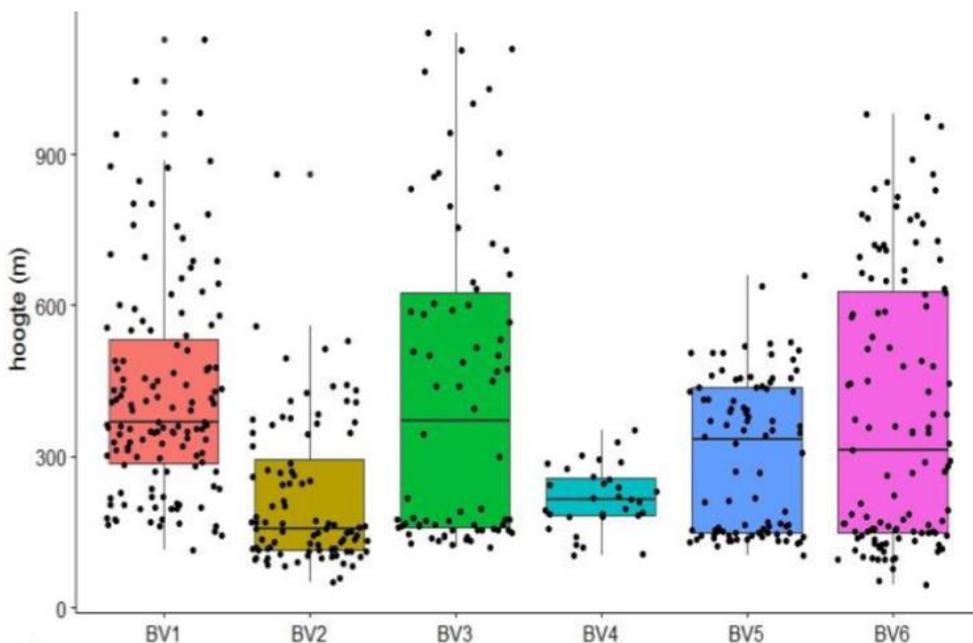


Figure 6 : Répartition verticale des positions GPS de 6 noctules de Leisler et Belgique en août 2018 (altitude par rapport au niveau de la mer ; l'altitude moyenne de la zone d'étude est de l'ordre de 300m). (Janssen et al. 2019).

2.3 Mortalité

Concernant les effets des variables environnementales sur la mortalité, l'étude de référence sur le sujet en Europe du Nord-Ouest a été réalisée par Rydell et al. (2010). Ces derniers montrent, en termes d'effet du paysage, que la mortalité est étroitement liée aux paramètres de paysages tels que la topographie et la végétation, indépendamment de la région ou du pays. Les nombres estimés d'individus tués par éolienne par an étaient estimés de la manière suivante :

- 0-3 dans des plaines ouvertes de basse altitude ;
- 2-5 dans des paysages agricoles plus complexes ;
- 5-20 sur les côtes ou sur des crêtes/collines boisées.

En termes d'effet du type d'éolienne, trois éléments ressortent (Rydell et al. 2010) :

- plus le mat est grand, plus la mortalité est importante ;
- plus le diamètre du rotor est grand, plus la mortalité est importante ;
- la mortalité est indépendante de la distance depuis le sol jusqu'au bas de la pale.

Précisons que ces résultats concernent les premières générations d'éoliennes, nettement plus petites que les éoliennes actuellement en projet.

L'augmentation de la mortalité avec la taille des éoliennes a aussi été notée aux Etats-Unis par Thompson et al. (2017) dans une synthèse bibliographique, sans précision quant à un éventuel effet de la taille des rotors (les grandes éoliennes ont généralement, mais pas toujours, de plus grands rotors que les petites). Les mêmes auteurs précisent néanmoins que certaines études présentent des résultats opposés (les petites éoliennes tuant plus de chauves-souris que les grandes). Plus récemment, Guest et al. (2022) ont également mis en avant que la relation entre la mortalité et la hauteur ou les autres dimensions de l'éolienne n'est pas claire.

Remarque concernant les taux de mortalité des chauves-souris par éolienne

Les dernières informations disponibles sur les taux de mortalité moyen des éoliennes en Europe suggèrent des taux nettement plus élevés que ceux mentionnés par Rydell et al. (2010). Par exemple de l'ordre de 14 individus par éolienne et par an en moyenne en Europe, et jusqu'à 70 individus par éolienne sur seulement 2 mois (août et septembre) pour de petites éoliennes (Enercon 66, nacelle à 64,8 m et diamètre de rotor de 70 m) mises en œuvre en 2001 dans la région de Berlin (Voigt et al. 2022). En Wallonie, l'étude la plus poussée à ce jour a conclu à une mortalité moyenne de l'ordre de 8 individus par éolienne par an en milieu agricole ouvert et sans application de module d'arrêt (Rico et Lagrange 2016).

Concernant les espèces impactées, 95 % des cadavres retrouvés sous les éoliennes en Europe appartiennent à 6 genres : *Nyctalus*, *Vespertilio*, *Pipistrellus*, *Hypsugo*, *Miniopterus* et *Tadarida* (Durr 2023). Les trois espèces les plus fréquemment retrouvées sont la pipistrelle commune, la pipistrelle de Nathusius et la noctule commune.

L'impact de cette mortalité sur les populations est mal connu. En France, où le programme de monitoring VigieChiro est en place depuis 2006, un déclin alarmant de 88 % entre 2006 et 2019 a été mis en évidence pour la noctule commune. L'éolien est considéré comme potentiellement responsable de ce déclin.

3 Analyse des données relatives aux points d'écoute

3.1 Méthode

3.1.1 Campagnes d'inventaires

Les données compilées proviennent d'inventaires réalisés entre 2015 et 2021 dans le cadre de 23 études d'incidences sur l'environnement pour l'implantation de parcs éoliens. Ces inventaires ont été réalisés sur base du protocole suivant.

Entre 9 et 14 points d'écoutes (PE) de cinq minutes d'enregistrement ont été placés dans un rayon de 500 m autour des positions prévues pour les éoliennes en projet. Ils ont été positionnés à proximité des éléments linéaires du paysage potentiellement attractifs pour les chauves-souris : haies, alignements d'arbres, mares, lisières forestières, etc. Dans le cas où l'emplacement d'une éolienne en projet était situé à moins de 200 m d'une lisière forestière, des points d'écoutes ont spécifiquement été placés à intervalles régulières entre la lisière et l'éolienne. Ces ensembles de trois à cinq points d'écoute situés à proximité d'une lisière et proches les uns des autres sont dénommés dans ce rapport « relevés lisières ». Neuf ou douze inventaires ont été réalisés sur chaque site d'avril à mi-octobre, dans des conditions favorables à l'activité des chauves-souris (pas de pluie, vent faible, température au coucher du soleil $\geq 10^{\circ}\text{C}$), à l'aide d'un détecteur- enregistreur Batlogger M[®]. Ces inventaires se sont déroulés à partir du coucher du soleil jusqu'au temps nécessaire pour effectuer le nombre de PE établis, c'est-à-dire entre 2 h et 3h selon la taille des sites.

La répartition des PE en fonction de leur distance à la lisière forestière la plus proche est illustrée à la figure suivante.

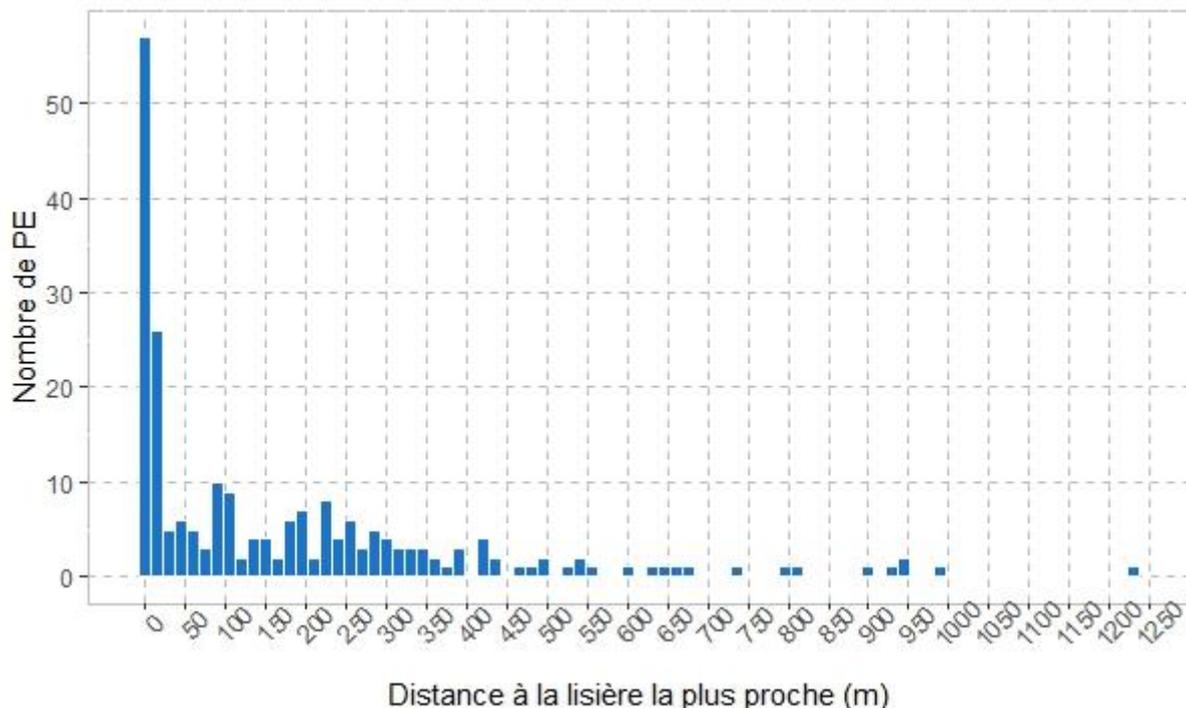


Figure 7: Répartition des points d'écoutes par rapport à la lisière forestière.

3.1.2 Echantillonnage acoustique

Nous avons utilisé le nombre de « contacts » afin de mesurer l'activité chiroptérologique à chaque PE. Un contact correspond à une séquence sonore de 5 secondes contenant au moins un cri d'écholocation de chauves-souris. Il s'agit de l'unité standard d'activité en Europe (Millon et al. 2015; Put et al. 2019).

Le logiciel Sonochiro® a été utilisé pour établir un classement préliminaire au niveau taxonomique de ces contacts. Cet outil permet d'obtenir une identification/classification pour la plupart des contacts, qui sont ensuite et selon un échantillonnage, validés manuellement par l'analyse des sonogrammes. L'ensemble de ces analyses, automatiques et manuelles, intégrant notamment la méthode de détermination de Barataud (2015), permet dans de nombreux cas la détermination de l'espèce ou du groupe d'espèces à laquelle appartient l'individu enregistré.

Enfin, les espèces identifiées ont été regroupées au sein de trois guildes basées sur des structures de cris d'écholocation traduisant des comportements de chasse similaires. Il s'agit du groupe des glaneurs (« *short-range echolocators* », SRE), des chasseurs généralistes en structure de bordure (interface entre la végétation et milieu ouvert) (« *mid-range echolocators* », MRE) et les chasseurs rapides en terrain ouvert (« *long-range echolocators* », LRE). Le premier groupe comprend les espèces des genres *Myotis*, *Barbastella* et *Plecotus*, le deuxième comprend les espèces du genre *Pipistrellus* et le troisième comprend les espèces des genres *Nyctalus*, *Eptesicus* et *Vespertilio* (Denzinger et Schnitzler 2013; Frey-Ehrenbold et al. 2013). Cette classification est similaire à celle utilisée dans différents articles traités dans l'analyse bibliographique.

Le nombre de contacts total par point d'écoute au cours d'une saison a été utilisé comme mesure de l'activité chiroptérologique.

3.1.3 Mesure des variables paysagères

En accord avec ce qui a été précédemment démontré dans la littérature, nous avons sélectionné une série de variables paysagères connues pour influencer positivement (présence de haies, milieux humides, prairies,...) ou négativement (pollution lumineuse, milieux artificiels, milieux arables ...) l'activité chiroptérologique (Azam et al. 2016; Heim et al. 2018; Leroux et al. 2022). Toutes ces variables paysagères ont été extraites et mesurées à l'aide de l'outil QGIS.

L'occupation du sol a été caractérisée pour les rayons suivants : 250 m, 500 m, 750 m et 1000 m (Leroux et al. 2022) sur base des données Ecotopes du projet « LifeWatch » (Radoux et al. 2019). L'occupation du sol ainsi extraite a ensuite été regroupée en cinq catégories : milieux arables, milieux forestier, milieux prairiaux, milieux artificiels et plans d'eau. Les données du « LifeWatch » ont également permis d'extraire un indice de pollution lumineuse au niveau de chaque PE, le type de forêt la plus proche de chacun d'eux et la distance aux milieux humides le plus proche.

La distance à la lisière forestière la plus proche a été calculée sur base de la couche « masque forestier » de la plateforme Forestimator (Lisein et al. 2022). La distance aux haies et alignements d'arbres les plus proches, ainsi qu'aux arbres isolés a été calculée sur base de données fournies par le DEMNA (Q. Smits). Grâce à ces informations, le linéaire de haies et d'alignements d'arbres a également été calculé au sein des rayons suivants : 250 m, 500 m, 750 m et 1000 m (Leroux et al. 2022).

Tableau 1: Liste des variables paysagères mesurées utilisées pour l'analyse des données des points d'écoute.

Variable	Type	Unité	Source
Occupation du sol (%)	Quantitative	%	Lifewatch Ecotope
Pollution lumineuse	Quantitative	Radiance (W·m ⁻² ·sr ⁻¹)	Lifewatch Ecotope
Distance à la lisière forestière	Quantitative	Mètres	Forestimator
Distances aux haies, alignements d'arbres et arbres isolés	Quantitative	Mètres	DEMNA
Linéaire d'haies et arbres	Quantitative	Mètres	DEMNA
Distance aux routes	Quantitative	Mètres	WalOnMap

D'autres variables ont été extraites mais ont été jugées non utilisables pour l'exercice statistique. En particulier, une variable « peuplement forestier » avait été extraite en vue d'étudier l'effet du type de

peuplement (feuillu, résineux ou mixte) sur l'activité des chauves-souris. Elle n'a malheureusement pas pu être utilisée en raison du très faible nombre de PE situés à proximité de lisières résineuses, en comparaison avec ceux situés à proximité d'une lisière feuillue (figure suivante).

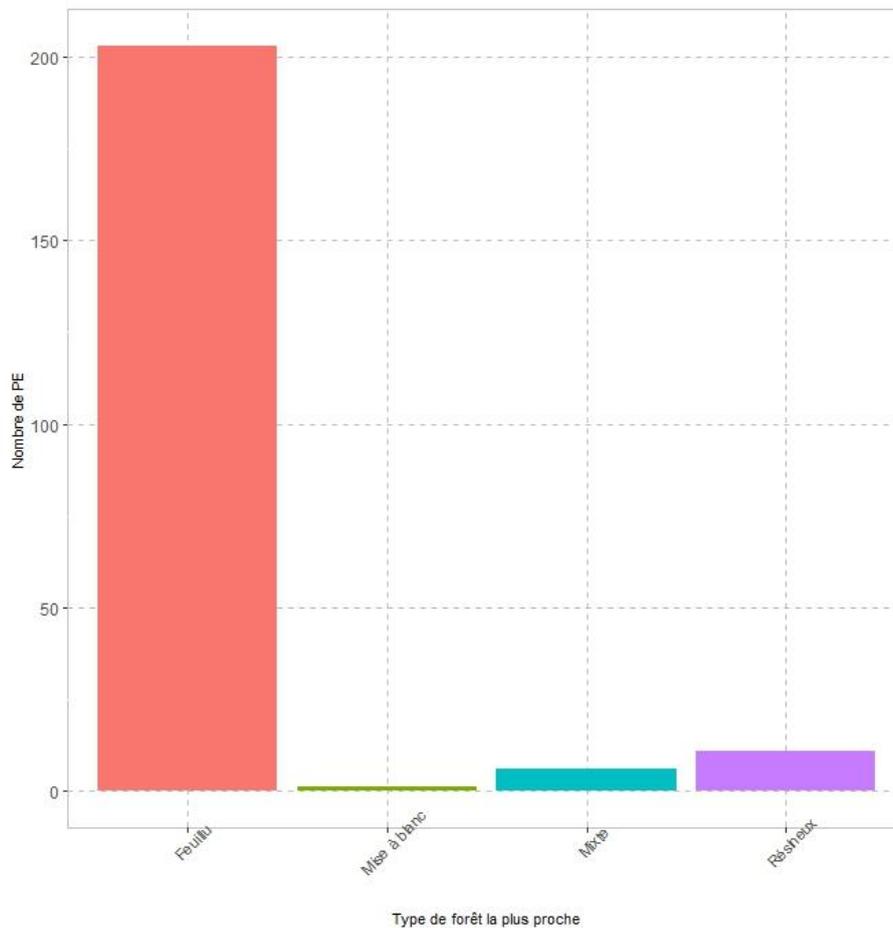


Figure 8 : Nombre de PE en fonction du type de forêt la plus proche.

3.1.4 Analyse statistique

Toutes les opérations statistiques ont été réalisées sur le logiciel R (4.3.1). Afin d'étudier l'effet de la distance horizontale aux lisières forestières et des autres variables paysagères sur l'activité chiroptérologique, nous avons utilisé des modèles linéaires généralisés à effets mixtes (GLMMs, package *glmmTMB*).

Au vu de la nature de la variable réponse, l'activité chiroptérologique totale enregistrée à chaque point d'écoute durant l'ensemble des inventaires, nous avons utilisé une distribution binomiale négative. Cette distribution est recommandée en écologie lorsque la variable réponse est le résultat d'un comptage, comme c'est le cas ici (nombre de contacts de chauves-souris) (Warton 2022). Nous avons également intégré le facteur « projet » comme variable aléatoire pour contrôler plusieurs effets intrinsèques aux points d'écoute inventoriés dans le cadre d'un même projet éolien (date d'inventaires, conditions météo, année, région, etc...). La fonction lien qui est utilisée pour relier l'activité des chauves-souris aux variables explicatives potentielles est la fonction logarithmique.

Afin d'étudier l'activité chiroptérologique en fonction de la distance à la lisière forestière, deux approches ont été utilisées. La première intègre comme effet fixe la distance à la lisière forestière en tant que variable continue. La deuxième intègre comme effet fixe la distance à la lisière forestière en tant que variable catégorielle. Dans ce cas-ci, les PE ont été regroupés au sein de classes de distance de tailles comparables, basée sur les quintiles (donc en cinq classes). Nous avons envisagé la possibilité de définir plus de groupes, pour étudier plus finement l'évolution de l'activité à proximité des lisières. Toutefois, le nombre de PE situés dans certaines gammes de distance, en particulier entre 50 et 150 m, était trop faible pour définir plus de groupes. Par rapport à l'approche continue, l'approche

« catégorielle » peut s'avérer utile si la variable étudiée n'évolue pas de manière continue, mais varie plutôt suivant des seuils.

Chacune de ses deux approches a par la suite été appliquée à deux jeux de données différents. Le premier comporte l'ensemble des PE (n = 199). Le deuxième ne comporte que les PE situés jusqu'à 200 m d'une lisière forestière (n = 129). Cette valeur représente la distance à respecter recommandée par Eurobats (Rodrigues et al. 2014) et coïncide avec un des objectifs de cette étude, à savoir étudier l'activité chiroptérologique à proximité des lisières.

Ces deux modèles ont été construits en partant de modèles complets comportant cinq autres variables paysagères en plus de la distance à la lisière forestière. A partir de ces modèles complets, les variables prédictives, à l'exception de la distance à la lisière forestière (variable d'intérêt), ont été supprimées du modèle une à une de manière progressive jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de raison statistiquement valable d'en supprimer. Cela a été défini sur base de leur critère d'information d'Akaike (AIC). Les combinaisons contenant l'AICc le plus faible et la variable d'intérêt ont été conservées.

La colinéarité entre chaque paire de variables environnementales a également été mesurée et prise en compte afin d'affiner le modèle complet. Aucune colinéarité significative n'a été mesurée.

3.2 Résultats

3.2.1 Jeu de données complet

En considérant le jeu de données complet (n = 199 PE), le modèle sélectionné est le suivant :

$$\text{Activité chiroptérologique} \sim \text{Distance à la lisière forestière} + \text{pollution lumineuse} + \% \text{forêt}(250 \text{ m}) + \text{linéaire}(250 \text{ m}) + (1|\text{projet})$$

Les effets fixes sont identiques aussi bien lorsque la distance à la lisière est considérée comme une variable continue ou catégorielle (classes de distance).

3.2.1.1 Distance à la lisière forestière comme variable continue

Sur base de ce modèle, deux des effets fixes influencent l'activité chiroptérologique de manière significative. Il s'agit de la proportion de forêt dans un rayon de 250 m ainsi que le linéaire de haies et d'alignements d'arbres dans un rayon de 250 m. Ces deux effets fixes influencent positivement l'activité chiroptérologique. Aucun effet significatif de la distance à la lisière forestière et de la pollution lumineuse n'a été mis en évidence.

Tableau 2 : Récapitulatif des effets des variables sur base du modèle contenant la distance à la lisière comme variable continu. Effet significatif : *(vert) ; tendance : .(jaune).

Effets fixes	Coefficient	p-valeur
Distance à la lisière forestière	<0,001	0,984
Pollution lumineuse	-0,017	0,163
%forêt (250 m)	1,498	0,001*
Linéaire (250 m)	0,224	0,005*

Sur base du R² calculé, la fraction de la variance des données expliquée par le modèle (effets fixes et aléatoires) est de 0,34. Les effets fixes expliquent 0,07 de la variance. Les relations entre l'activité prédite et les variables explicatives significatives sont illustrées à la figure suivante.

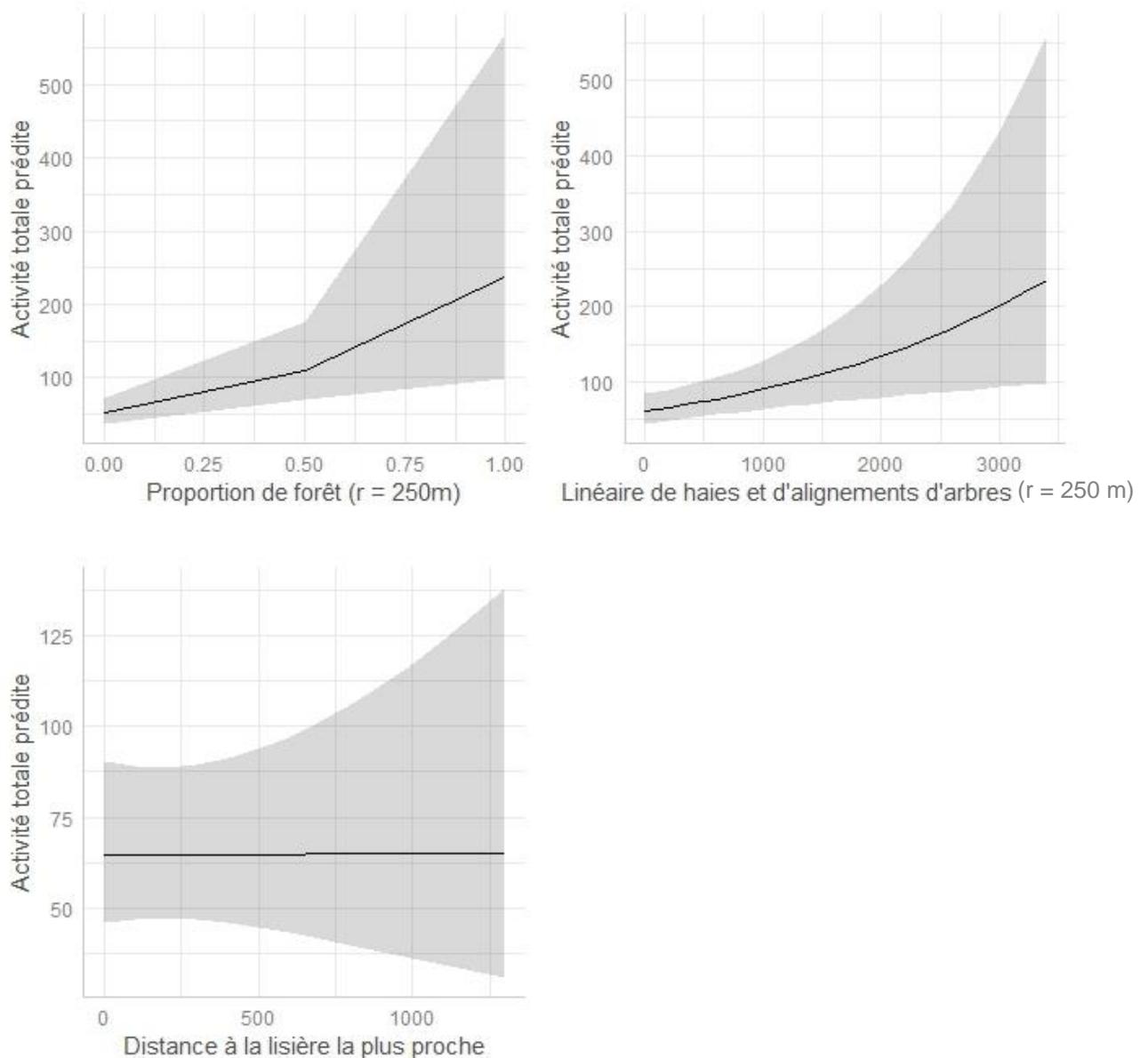


Figure 9 : Activité chiroptérologique totale prédite par PE pour l'ensemble des inventaires (45 à 60 min cumulées sur l'année) en relation à la distance à la forêt et à la proportion de forêt ainsi que le total d'alignements d'arbres et de haies dans un rayon de 250 m autour du point d'écoute.

Même si la variable explicative d'intérêt, à savoir la distance aux lisières, n'apparaît pas explicitement comme significative, un effet significatif des forêts est mis en évidence avec l'effet de la proportion de forêts dans un rayon de 250 m.

3.2.1.2 Distance à la lisière forestière comme variable catégorielle

Pour ce cas de figure, les PE ont été regroupés en cinq groupes de tailles similaires (c'est-à-dire de 40 à 51 PE par groupe), basés sur leur distance à la lisière forestière. Les groupes sont les suivants : [0-5 m], [5-45 m], [45-165 m], [165 m-300 m] et > 300 m.

Lorsque la distance est considérée de cette manière, on constate un effet significatif de la distance à la lisière la plus proche sur l'activité chiroptérologique. En effet, comme détaillé au tableau suivant, il n'y a pas de différence significative entre l'activité mesurée au niveau de la lisière [0-5 m] et celle mesurée entre [5 et 45 m] de celle-ci, mais l'activité baisse significativement à partir de l'intervalle [45-165 m]. Au-delà de 165 m, l'activité n'est plus significativement différente de celle mesurée à la lisière forestière. Une tendance concernant une baisse d'activité entre la lisière et deux classes de distances éloignées

([165 m-300 m] et [300 m-]) est toutefois observée. Il est possible qu'à partir de 165 m, d'autres effets non-mesurés influencent l'activité chiroptérologique.

Comme précédemment, un effet significatif du linéaire de haies et d'alignements dans un rayon de 250 m autour du point d'écoute est présent. Cet effet influence positivement l'activité chiroptérologique. L'effet de la part de forêts dans un rayon de 250 m n'apparaît par-contre plus comme significatif.

Tableau 3 : Récapitulatif des effets des variables sur base du modèle contenant la distance à la lisière comme variable continue. Effet significatif : *(vert) ; tendance : .(jaune)

Effets fixes	Coefficient	p-valeur
[0-5 m] vs. [5 m-45 m]	0,045	0,820
[0-5 m] vs. [45 m-165 m]	-0,519	0,017 *
[0-5 m] vs. [165 m-300 m]	-0,435	0,079 .
[0-5 m] vs. [300 m -]	-0,440	0,097 .
%forêt (250 m)	0,596	0,316
Pollution lumineuse	-0,016	0,186
Linéaire (250 m)	0,246	0,002 *

Sur base du R² calculé, la fraction de la variance des données expliquée par le modèle (effets fixes et aléatoires) est de 0,38. Les effets fixes expliquent 0,09 de la variabilité.

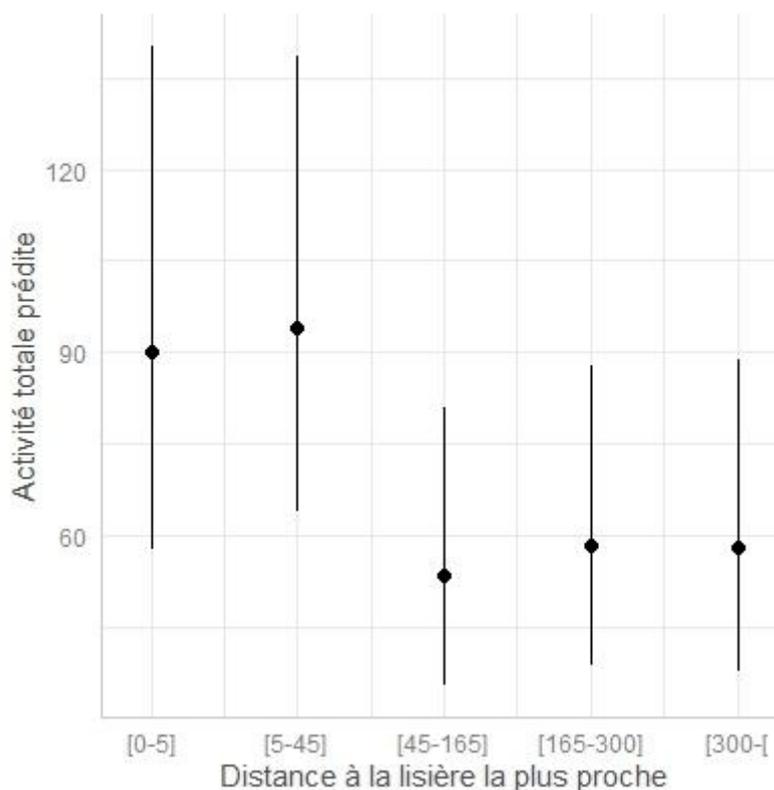


Figure 10 : Activité totale prédite par PE en fonction de la distance à la lisière forestière.

3.2.2 Jeu de données réduit, [0-200 m]

En considérant les données provenant de points d'écoutes situés jusqu'à 200 m de la lisière forestière, le modèle sélectionné est le suivant :

$$\text{Activité chiroptérologique} \sim \text{Distance à la lisière forestière} + \text{pollution lumineuse} + \% \text{artificiel}(250 \text{ m}) + \text{linéaire}(250 \text{ m}) + (1|\text{projet})$$

Les effets fixes sont identiques aussi bien lorsque la distance à la lisière est considérée comme une variable continue ou catégorielle (classes de distance).

3.2.2.1 Distance à la lisière forestière comme variable continue

Sur base de ce modèle, deux des effets fixes influencent l'activité chiroptérologique de manière significative. Il s'agit de la distance entre le point d'écoute et la lisière forestière ainsi que la pollution lumineuse au niveau du point d'écoute. L'activité chiroptérologique à un point d'écoute est négativement influencé par ces deux effets fixes. Aucun effet significatif du linéaire de haies et d'alignements d'arbres ainsi que la proportion de milieux artificiels dans un rayon de 250 m n'a été mis en évidence.

Tableau 4 : Récapitulatif des effets des variables sur base du modèle contenant la distance à la lisière comme variable continue. Effet significatif : *(vert) ; tendance : .(jaune)

Effets fixes	Coefficient	p-valeur
Distance à la lisière forestière	-0,006	<0,001*
Pollution lumineuse	-0,022	0,025*
%artificiels (250 m)	1,49	0,107
Linéaire (250 m)	0,152	0,138

Sur base du R² calculé, la fraction de la variance des données expliquée par le modèle (effets fixes et aléatoires) est de 0,31. Les effets fixes expliquent 0,15 de la variance.

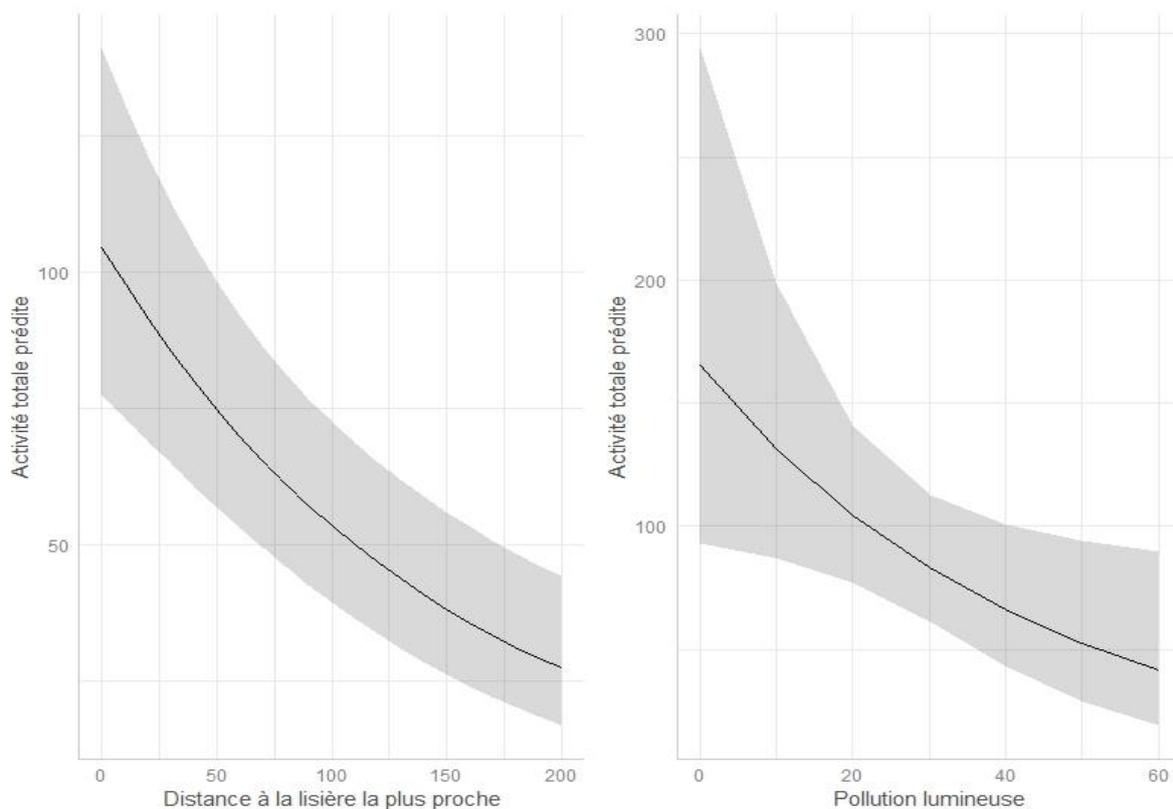


Figure 11 : Activité chiroptérologique totale prédite par PE en relation à la distance à la forêt et à la pollution lumineuse au niveau du point d'écoute.

Concernant l'effet spécifique de la distance à la lisière sur la valeur moyenne de l'activité des chauves-souris au sol, le modèle continu suggère que celle-ci diminue, en moyenne, de moitié entre 0 et 100 m. Le taux de décroissance entre 100 m et 200 m est très similaire. Nous verrons plus loin que l'approche « catégorielle » montre un gradient différent.

3.2.2.2 Distance à la lisière forestière comme variable catégorielle

Pour ce cas de figure, les données ont été regroupées en cinq groupes de tailles égales, basés sur leur distance à la lisière forestière. Les groupes sont les suivants : [0-3 m], [3-10 m], [10-35 m], [35 m-100 m] et [100-200 m]. Lorsque la distance aux lisières est considérée de cette manière, on constate également un effet significatif sur l'activité chiroptérologique.

En effet, comme détaillé au tableau suivant, il n'y a pas de différences d'activité significative entre la lisière et les classes [3-10 m] et [10-35 m], mais l'activité est significativement plus basse pour les classes éloignées [35-100 m] et [100-200 m] qu'au niveau de la lisière [0-3 m].

Comme précédemment, un effet significatif de la pollution lumineuse au niveau du point d'écoute est présent. Cet effet influence négativement l'activité chiroptérologique. Une tendance concernant un effet positif du linéaire de haies et d'alignements d'arbres dans un rayon de 250 m est également présente.

Tableau 5 : Récapitulatif des effets des variables sur base du modèle contenant la distance à la lisière comme variable catégorielle. Effet significatif : *(vert) ; tendance : .(jaune)

Effets fixes	Coefficient	p-valeur
[0-3 m] vs. [3-10 m]	-0,303	0,1872
[0-3 m] vs. [10-35 m]	-0,101	0,7012
[0-3 m] vs. [35-100 m]	-0,589	0,0284 *
[0-3 m] vs. [100-200 m]	-1,069	<0,001 *
%artificiels (250 m)	1,440	0,1331
Pollution lumineuse	-0,316	0,0279 *
Linéaire (250 m)	0,197	0,0659 .

Sur base du R² calculé, la fraction de la variance des données expliquée par le modèle (effets fixes et aléatoires) est de 0,32. Les effets fixes expliquent 0,14 de la variabilité.

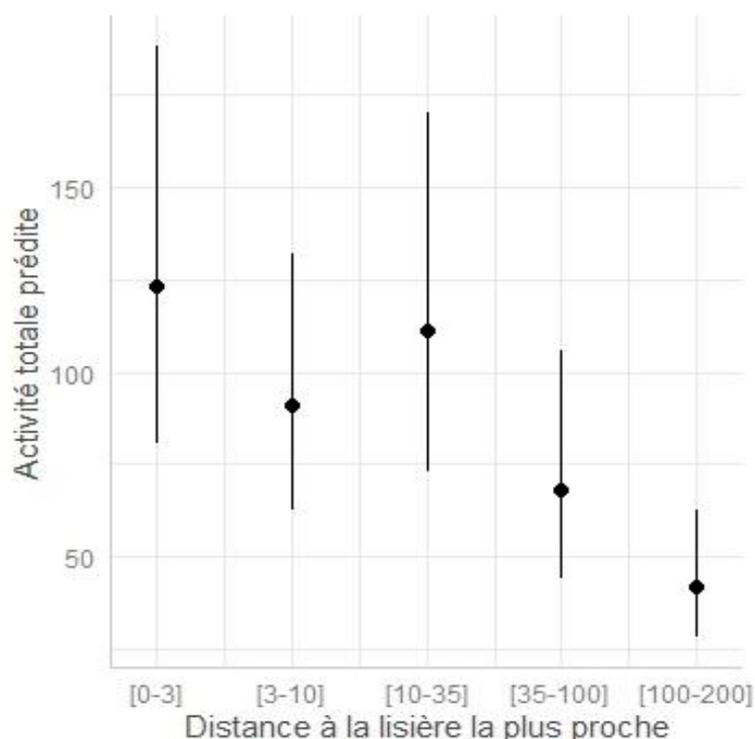


Figure 12 : Activité totale prédite en fonction de la distance à la lisière forestière.

L'analyse « catégorielle » suggère que l'activité de chauves-souris baisse significativement lorsqu'on s'éloigne de la lisière, et que cette baisse a lieu quelque part entre 35 et 100 m de la lisière.

4 Analyse des données relatives aux inventaires en continu

4.1 Méthode

4.1.1 Campagnes d'inventaires

Les données compilées proviennent d'inventaires réalisés entre 2017 et 2022 dans le cadre de 16 études d'incidences sur l'environnement pour l'implantation de parcs éoliens.

Ces 16 projets éoliens ont nécessité la mise en place d'un mât de mesure, de début avril à fin octobre, car une ou plusieurs éoliennes du projet étaient situées à moins de 200 m d'une lisière forestière. Deux à trois micros ont été installés sur chaque mât de mesure. Un micro était positionné proche du sol (2 à 5 m) et un autre à hauteur du bas de pale de l'éolienne en projet. Dans certains cas, un troisième micro a également été installé à une hauteur intermédiaire entre les deux autres micros.

Les enregistrements ont été réalisés à l'aide de détecteurs Song Meter SM3bat et SM4bat et de micros SMM-U2 (Wildlife Acoustics inc.). Les micros ont été placés horizontalement au-dessus du sol et ont été orientés en direction de la lisière forestière la plus proche. Les détecteurs ont enregistré automatiquement tous les ultrasons compris entre 16 kHz et 192 kHz, en utilisant un niveau de déclenchement par défaut et réglé pour continuer l'enregistrement jusqu'à trois secondes après l'élément déclencheur. La durée maximale d'un enregistrement est de 15 secondes.

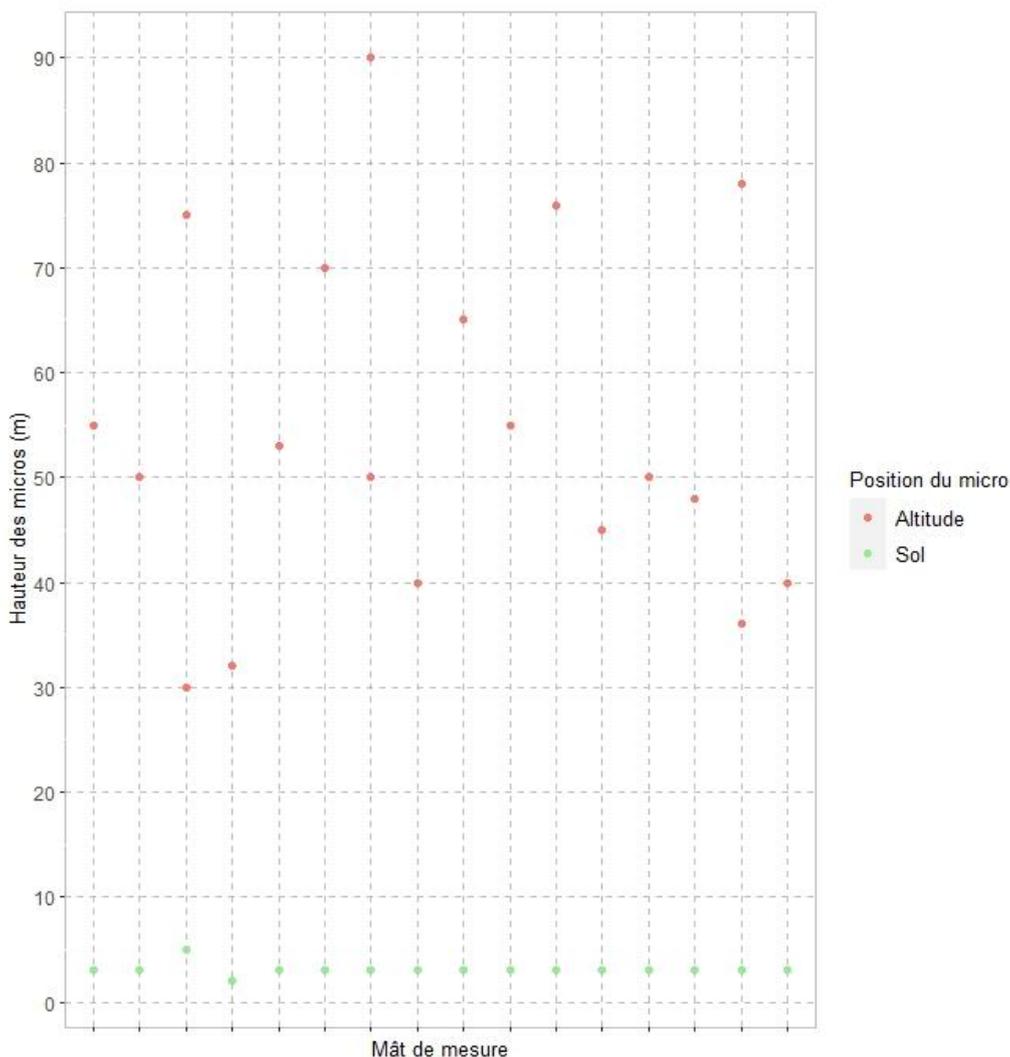


Figure 13: Récapitulatif des hauteurs de micros par mât de mesure.

4.1.2 Echantillonnage acoustique

L'analyse des ultrasons a été réalisée de la même manière que pour l'analyse des données des points d'écoute (voir partie 3.1.2). Le tableau suivant illustre le nombre total de contacts enregistrés sur les 16 sites, par micro et par guide.

Tableau 6: Activité totale enregistrée sur les 16 mats de mesure considéré dans cette étude (juin à septembre) par guides et par position de micro.

Guide	Sol	Altitude
LRE	26.262	16.230
MRE	184.330	61.026
SRE	14.690	356

4.1.3 Mesure des distances

La distance horizontale (Dh) entre chaque mât de mesure et la lisière forestière la plus proche a été mesurée manuellement sur base des imageries aériennes correspondants à l'année d'implantation du mât de mesure, à l'aide de WalonMap (figure suivante).

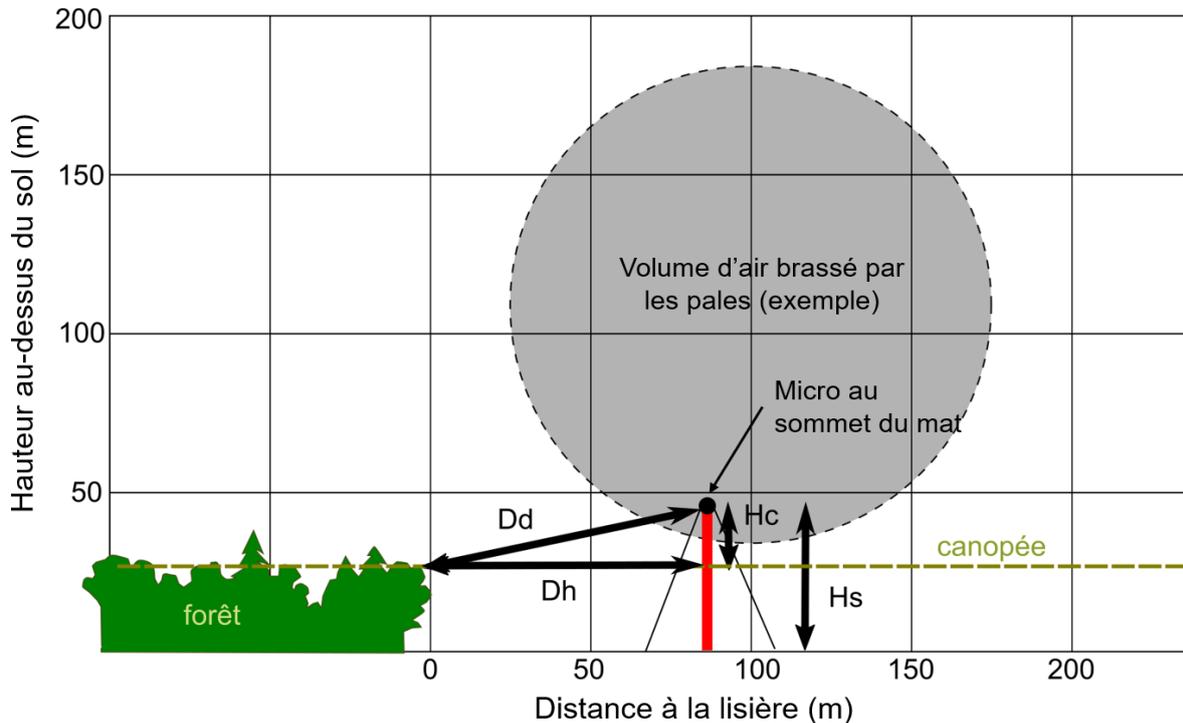


Figure 14: Illustration du protocole d'enregistrement en continu sur un mat de mesure. Les doubles flèches représentent les 4 types de distances qui ont été mesurées dans le cas du micro « en altitude » : Hs : hauteur au-dessus du sol, Hc : hauteur par rapport à la canopée, Dh : distance horizontale à la lisière, Dd : distance diagonale à l'intersection entre le plan de la canopée et le plan de la lisière.

La hauteur de la canopée a été calculée à l'aide de l'outil Forestimator (Lisein et al. 2022). La valeur obtenue correspond à la hauteur moyenne au-dessus du sol de la canopée dans un rayon de 200 m autour du mât de mesure. Cette distance de 200 m nous a paru être un bon compromis pour évaluer la hauteur moyenne de la canopée à proximité du mat.

La hauteur au-dessus de la canopée (Hc) est la distance verticale entre un micro et la canopée. Elle est positive pour les micros situés au-dessus, et négative pour les micros situés en-dessous de la hauteur de la canopée. La hauteur au-dessus du sol (Hs) est la différence d'altitude entre le micro et le sol. Enfin, la distance diagonale (Dd) correspond à l'hypoténuse du triangle rectangle dont les deux autres côtés correspondent à Hc et Dh (figure précédente).

La répartition des micros sur les 16 mats de mesure par rapport à la position de la canopée et de la lisière la plus proche est illustrée à la figure suivante.

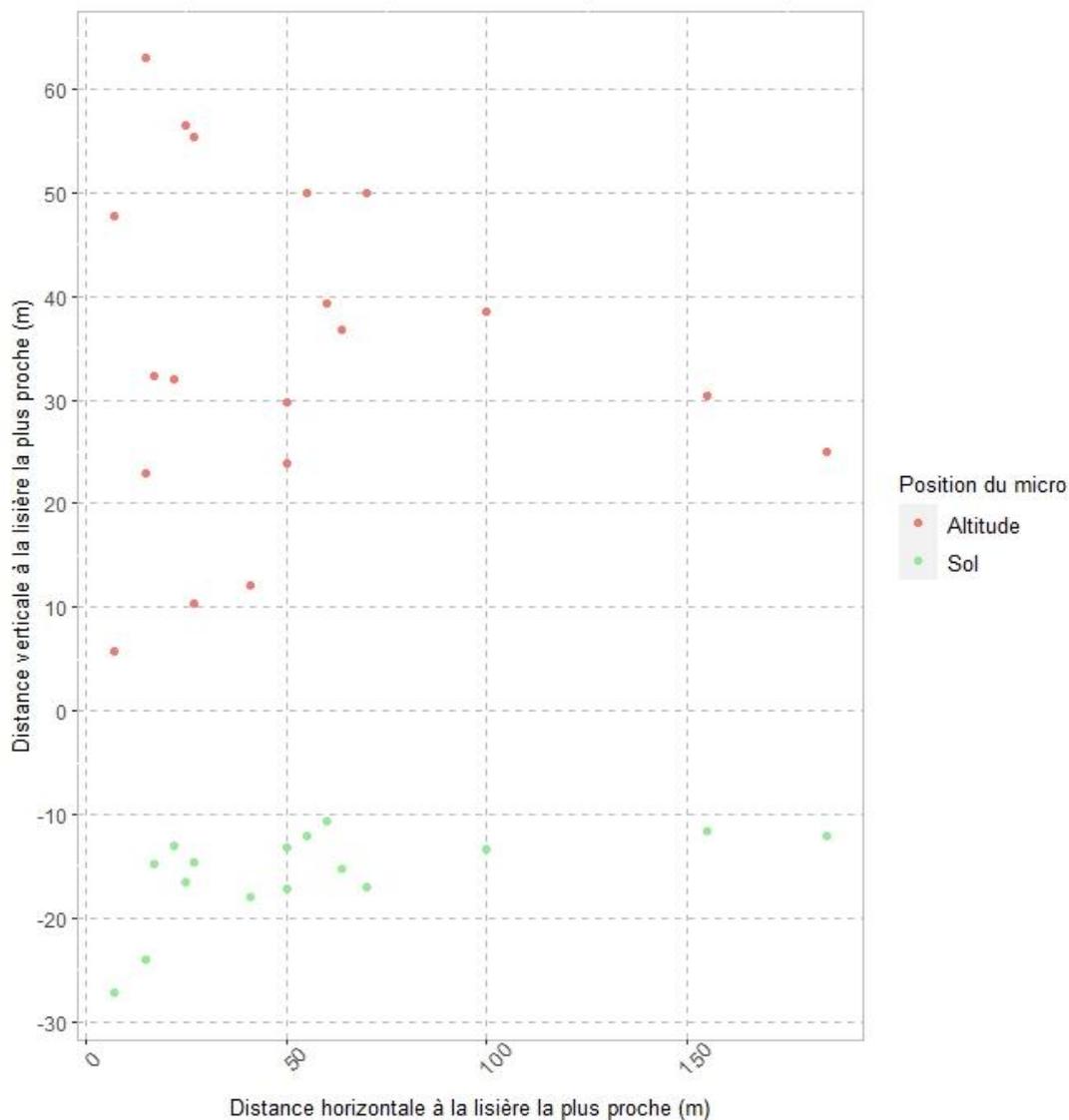


Figure 15: Distance verticale et horizontale de chaque micro par rapport à la lisière/canopée la plus proche. La distance verticale est donc une distance à la canopée et non à la végétation au pied du mat, qui est généralement une végétation herbacée (prairie, culture, coupe-feu, mise à blanc).

4.1.4 Analyse statistique

Toutes les opérations statistiques ont été réalisées sur le logiciel R (4.3.1). Afin d'étudier l'effet de la distance entre le bas de pales et la végétation sur l'activité chiroptérologique nous avons utilisé des modèles linéaires généralisés à effets mixtes (GLMMs, package glmmTMB), de la même manière que pour l'analyse des enregistrements par points d'écoute.

L'analyse s'est limitée à la construction de modèles simples, ne contenant que la distance entre la canopée/la lisière forestière ou le sol et le micro comme effets fixes par rapport à l'activité chiroptérologique par guildes ainsi que deux effets aléatoires correspondant au site d'implantation du mat et à l'année d'inventaire. Les effets de distances ont été étudiés de quatre manières :

- Premièrement, en considérant l'activité chiroptérologique au sol en fonction de la distance horizontale à la lisière forestière ;
- Deuxièmement, en considérant l'activité chiroptérologique en altitude en fonction de la distance horizontale à la lisière forestière et de la distance verticale à la canopée ;

- Troisièmement, en considérant l'activité chiroptérologique en altitude en fonction de la distance diagonale à la lisière forestière.
- Quatrièmement, en considérant l'activité chiroptérologique en altitude et au sol en fonction de la distance horizontale à la lisière forestière et de la distance verticale à la canopée ;
- Enfin, en considérant l'activité chiroptérologique en altitude et au sol en fonction de la distance horizontale à la lisière forestière et de la hauteur au-dessus du sol.

Les modèles ont été réalisés sur plusieurs périodes : juin, juillet, août et septembre ainsi que ces quatre mois réunis (« été »). Ces mois ont été sélectionnés sur base de leur activité chiroptérologique. En effet, l'activité chiroptérologique est généralement concentrée sur ces quatre mois qui correspondent aux périodes de fin de gestation et nourrissage des juvéniles (~15 juin – ~31 juillet) et à l'envol des jeunes (~15 août – ~30 septembre) (Kerbiriou et al. 2019) .

Au vu de la nature de la variable réponse, l'activité chiroptérologique totale par mois, nous avons utilisé une distribution binomiale négative (voir 3.1.4).

Les données contenant des anomalies liées à des dysfonctionnement du matériel d'enregistrement (trois sites en juin, deux sites en août, un site en septembre) n'ont pas été prises en compte dans la réalisation de ces modèles, ce qui réduit l'échantillon de 16 à 13 sites.

4.2 Présentation des données

Les valeurs mesurées d'activité sont présentées sur des graphes bivariés au regard des 4 variables de distance. L'ensemble de ces 78 graphiques et leur description sont disponibles en annexe.

- *Annexe B – Présentation des données relatives aux 13 inventaires en continu sur mats de mesure, au regard des distances au sol, à la lisière et à la canopée.*

4.3 Résultats de l'analyse statistique

Cinq types de modèles ont été réalisés pour étudier l'effet de la distance à la lisière (Dh et Dd), à la canopée (Hc) et au sol (Hs) sur l'activité chiroptérologique.

1. *Activité chiroptérologique au sol* ~ Distance horizontale à la lisière forestière + (1|site) + (1|année)
2. *Activité chiroptérologique en altitude* ~ Distance horizontale + distance verticale à la lisière forestière + (1|site) + (1|année)
3. *Activité chiroptérologique au sol et en altitude* ~ Distance horizontale + distance verticale à la canopée + (1|site) + (1|année)
4. *Activité chiroptérologique au sol et en altitude* ~ Distance horizontale + Hauteur par rapport au sol + (1|site) + (1|année)
5. *Activité chiroptérologique en altitude* ~ Distance diagonale à la lisière forestière + (1|site) + (1|année)

Chacun de ces modèles a été réalisés par guildes et par mois (juin, juillet, août, septembre) et pour l'ensemble de cette période (juin à septembre : « été »). Les résultats de ces modèles sont transcrits aux tableaux suivants.

4.3.1 Activité chiroptérologique au sol en fonction de la distance horizontale à la lisière forestière

Les modèles testés ont mis en évidence un effet significatif négatif de la distance horizontale pour la guildes des SRE, en juillet et août (fig. suivante). Cet effet n'apparaît pas pour les autres périodes. Concernant, les deux autres guildes, une tendance négative apparaît pour les mois de juin, août et la période « été » pour la guildes des LRE. Aucun effet n'est mis en évidence pour la guildes des MRE.

Tableau 7 : Récapitulatif des effets des variables sur l'activité au sol sur base des modèles contenant la distance horizontale à la lisière comme variable continue. Effet significatif : *(vert) ; tendance : .(jaune)

Guildes	Juin		Juillet		Août		Septembre		Été	
	Coeff.	p-val.	Coeff.	p-val.	Coeff.	p-val.	Coeff.	p-val.	Coeff.	p-val.
MRE	-0,001	0,896	-0,002	0,422	-0,005	0,163	-0,003	0,391	-0,002	0,452
LRE	-0,010	0,065.	-0,009	0,108	-0,012	0,073.	-0,006	0,313	-0,011	0,065.
SRE	-0,006	0,424	-0,014	0,001*	-0,013	0,050*	-0,007	0,189	-0,010	0,11

Les courbes correspondant aux effets significatifs sont illustrées à la figure suivante.

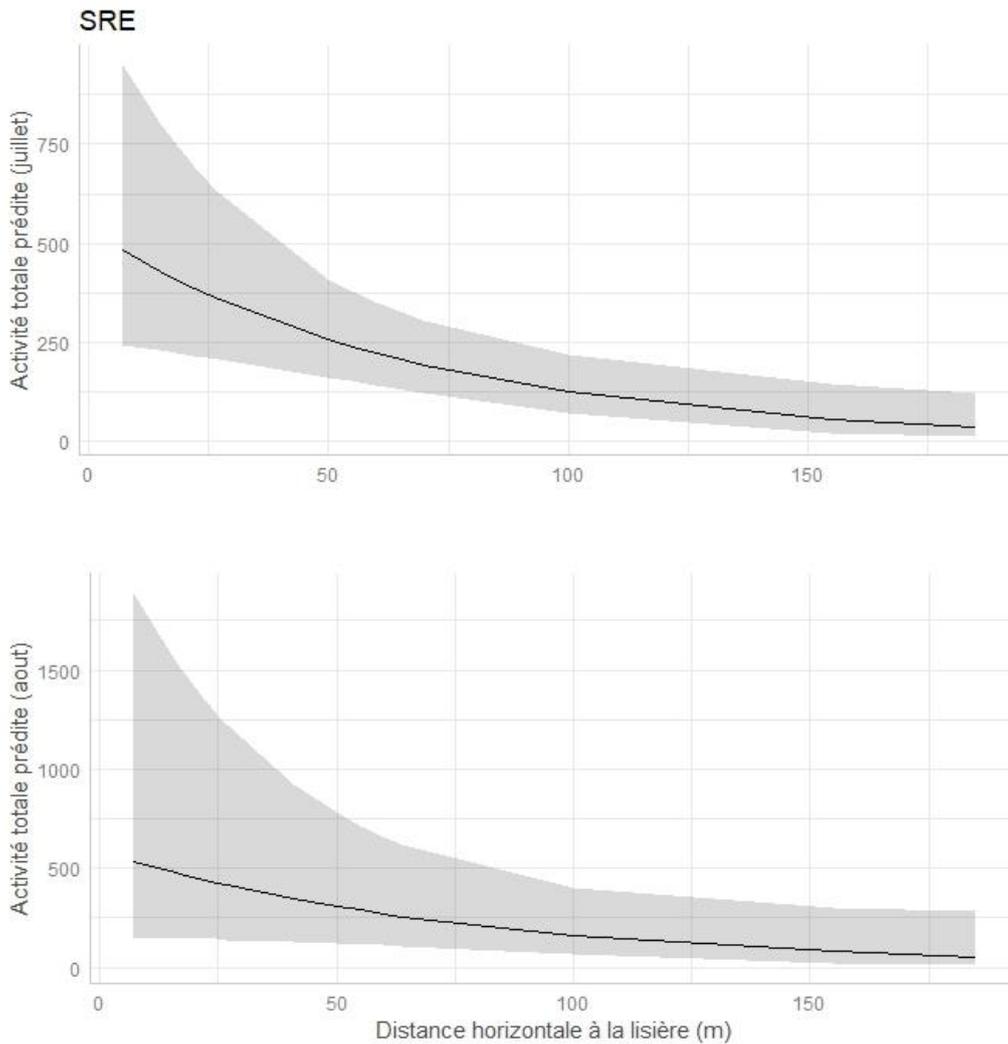


Figure 16 : Activité chiroptérologique au sol prédite en relation à la distance à la lisière la plus proche pour la guildes des SRE. R^2 : 0,34 et 0,19.

4.3.2 Activité chiroptérologique en altitude en fonction de la distance horizontale et verticale à la canopée

Les modèles suivants ont mis en évidence une série d'effets significatifs de la distance verticale à la canopée sur l'activité chiroptérologique. En effet, l'activité de la guildes des MRE est influencée négativement par la distance verticale à la canopée et ce, en août et durant la période « été ». Cette tendance s'observe également en septembre, de manière non significative. L'activité de la guildes des LRE est également négativement influencée par la distance à la canopée, mais seulement en juin.

Concernant la distance horizontale à la lisière forestière, ses effets sur l'activité en altitude sont plus restreints. En effet, seul le groupe des SRE est négativement influencé par cette distance et seulement en juin.

Tableau 8 : Récapitulatif des effets des variables sur l'activité en altitude sur base des modèles contenant la distance verticale à la canopée et la distance horizontale à la lisière comme variable continue. Effet significatif : *(vert) ; tendance : .(jaune)

Guilde		Juin		Juillet		Août		Septembre		Été	
		Coeff.	p-val.	Coeff.	p-val.	Coeff.	p-val.	Coeff.	p-val.	Coeff.	p-val.
MRE	Distance verticale	-0,001	0,645	-0,013	0,301	-0,034	0,008*	-0,017	0,068 .	-0,024	0,0188*
	Distance horizontale	<0,001	0,991	-0,001	0,804	-0,006	0,108	-0,001	0,780	-0,001	0,973
LRE	Distance verticale	-0,064	0,043*	-0,001	0,983	0,021	0,382	0,015	0,431	-0,006	0,733
	Distance horizontale	<0,001	0,991	-0,001	0,804	-0,006	0,108	-0,001	0,780	-0,001	0,973
SRE	Distance verticale	-0,002	0,94	-0,015	0,761	-0,002	0,924	0,019	0,529	-0,007	0,792
	Distance horizontale	-0,030	<0,001*	-0,011	0,237	-0,004	0,498	0,001	0,733	-0,001	0,88

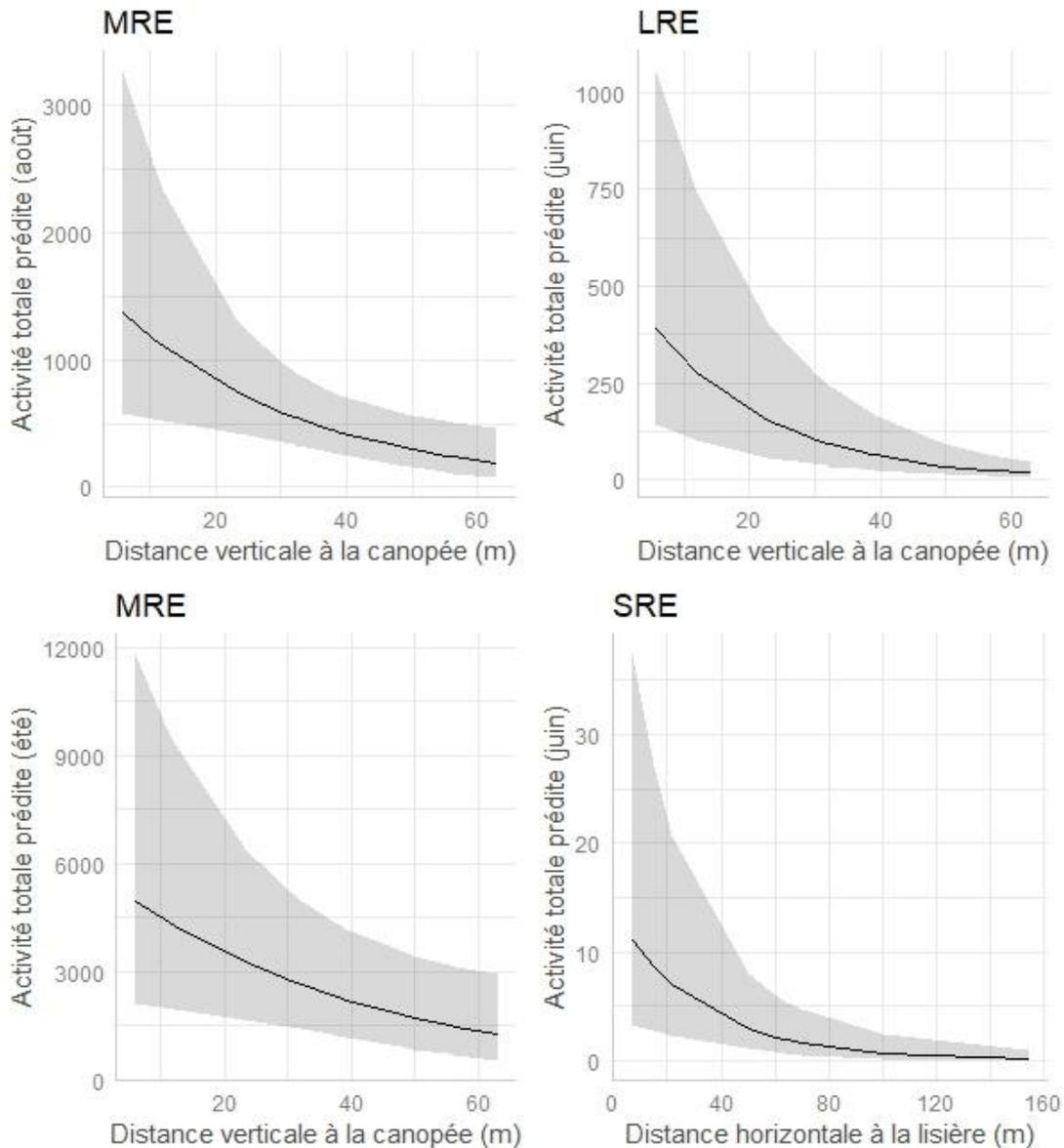


Figure 17 : Activité chiroptérologique en altitude prédite en relation à la distance horizontale à la lisière et la distance verticale à la canopée. D'en haut à gauche vers en bas à droite, R^2 : 0,41 ; 0,35 ; 0,56 et 0,92.

4.3.3 Activité chiroptérologique en altitude en fonction de la distance diagonale à la lisière forestière

Les modèles réalisés ont seulement mis en évidence un effet significatif négatif de la distance diagonale en altitude pour la guildes des SRE, en juin (figure suivante). Cet effet n'apparaît pas pour les autres périodes. Concernant, les deux autres guildes, une tendance d'un effet négatif (non significative) apparaît pour le mois d'août pour la guildes des LRE. Aucun effet n'est mis en évidence pour la guildes des MRE.

Ces résultats concordent avec ceux du point précédent, dont ils sont logiquement la combinaison.

Tableau 9 : Récapitulatif de l'effet de la distance diagonale à la lisière sur l'activité des chauves-souris mesurée en altitude. Effet significatif : *(vert) ; tendance : .(jaune)

Guilde	Juin		Juillet		Août		Septembre		Eté	
	Coeff.	p-val.	Coeff.	p-val.	Coeff.	p-val.	Coeff.	p-val.	Coeff.	p-val.
MRE	-0,001	0,678	-0,003	0,415	-0,007	0,076.	-0,003	0,049	-0,002	0,634
LRE	-0,002	0,708	-0,001	0,874	-0,035	0,723	-0,001	0,899	-0,001	0,903
SRE	-0,032	<0,001*	-0,008	0,460	-0,004	0,463	0,003	0,582	-0,001	0,804

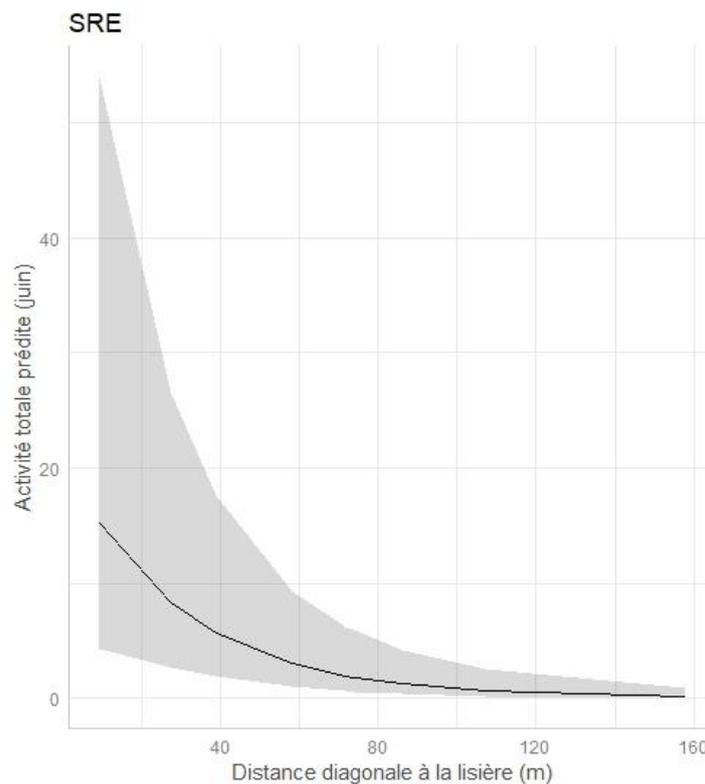


Figure 18: Activité chiroptérologique en altitude prédite par la distance diagonale à la lisière. $R^2 : 0,93$.

4.3.4 Activité chiroptérologique (sol et altitude) en fonction de la distance horizontale à la lisière forestière et la distance verticale à la canopée

Les modèles suivants ont mis en évidence une série d'effets significatifs de la distance verticale à la canopée sur l'activité chiroptérologique.

L'activité des guildes des MRE et des SRE est influencée négativement par la distance verticale à la canopée et ce, pour chacune des périodes considérées. La distance verticale à la canopée influence également de manière significative l'activité du groupe des LRE en juin et juillet. Cette tendance s'observe également en été, de manière non-significative.

Tableau 10 : Récapitulatif des effets des variables explicatives sur l'activité chiroptérologique au sol et en altitude des modèles contenant la distance horizontale Dh et verticale à la canopée Hc. Effet significatif : *(vert) ; tendance : (jaune).

Guilde		Juin		Juillet		Août		Septembre		Eté	
		Coeff.	p-val.								
MRE	Dh	<0,001	0,863	-0,001	0,850	-0,007	0,144	-0,003	0,430	-0,001	0,891
	Hc	-0,020	<0,001*	-0,027	<0,001*	-0,037	<0,001*	-0,018	<0,001*	-0,027	<0,001*
LRE	Dh	-0,001	0,843	-0,001	0,926	-0,008	0,175	-0,001	0,833	-0,003	0,643
	Hc	-0,021	0,001*	0,017	<0,001	-0,007	0,349	0,004	0,489	-0,012	0,076.
SRE	Dh	-0,005	0,452	-0,005	0,455	-0,005	0,408	-0,001	0,999	-0,001	0,838
	Hc	-0,072	<0,001*	-0,075	<0,001*	-0,064	<0,001*	0,007*	<0,001*	-0,071	<0,001*

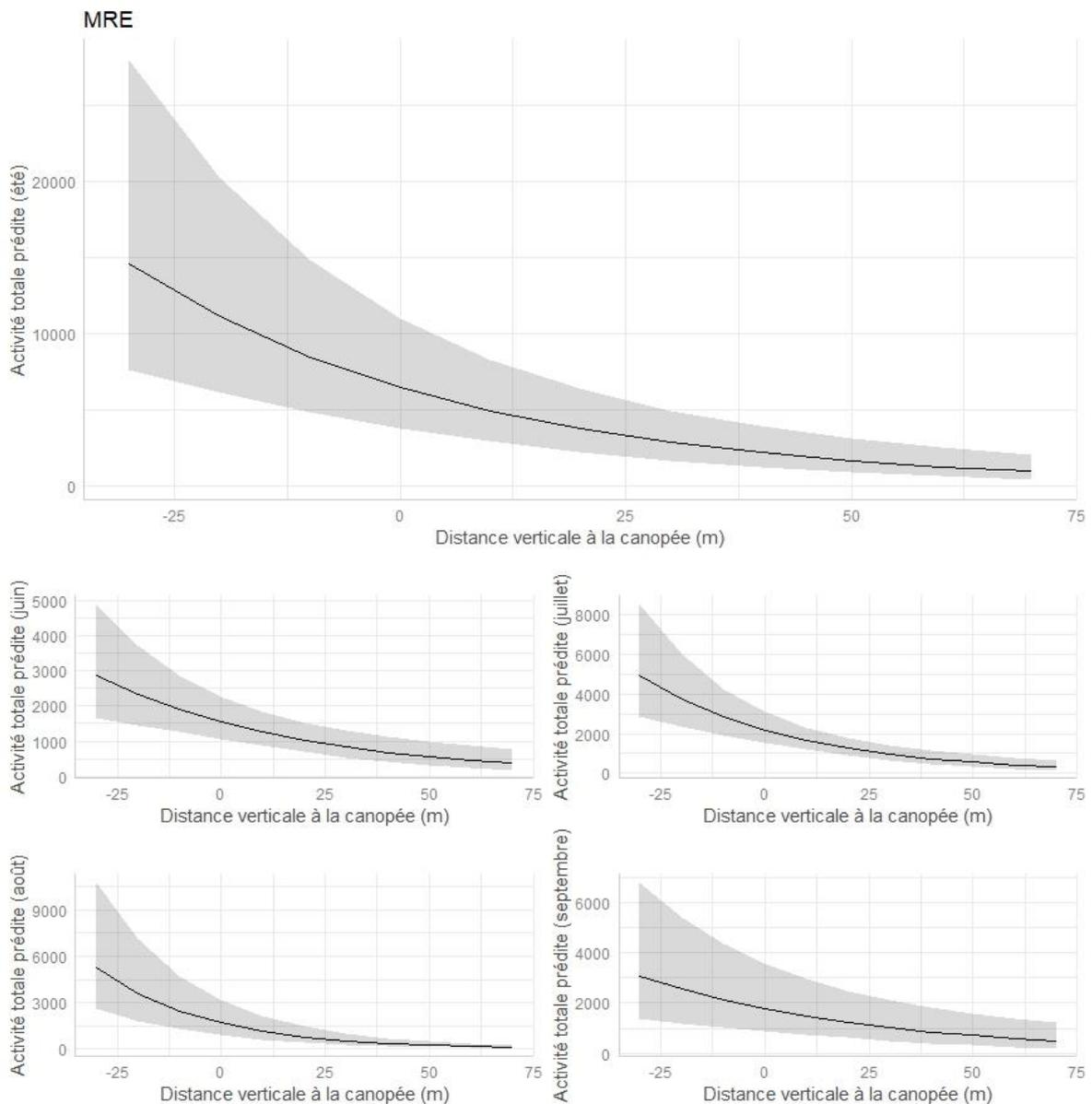


Figure 19: Activité de la guilde des MRE prédite en fonction de la distance verticale à la canopée. R^2 (supérieur) : 0,63 ; R^2 (gauche à droite) : 0,38 ; 0,32, 0,72 ; 0,58.

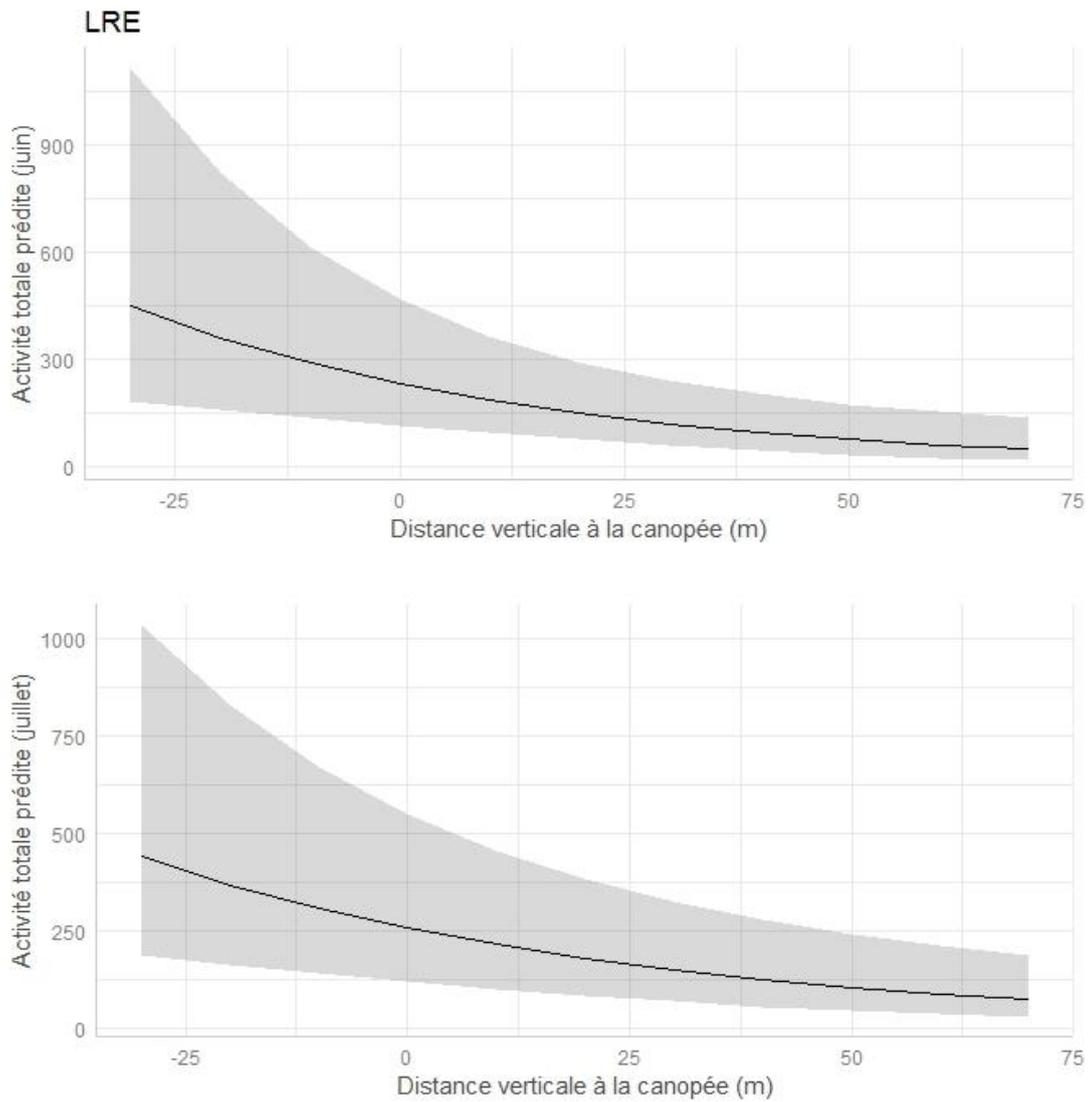


Figure 20 : Activité chiroptérologique de la guildes des LRE prédite en fonction de la distance verticale à la canopée. $R^2(\text{haut}) : 0,58$; $R^2(\text{bas}) : 0,75$.

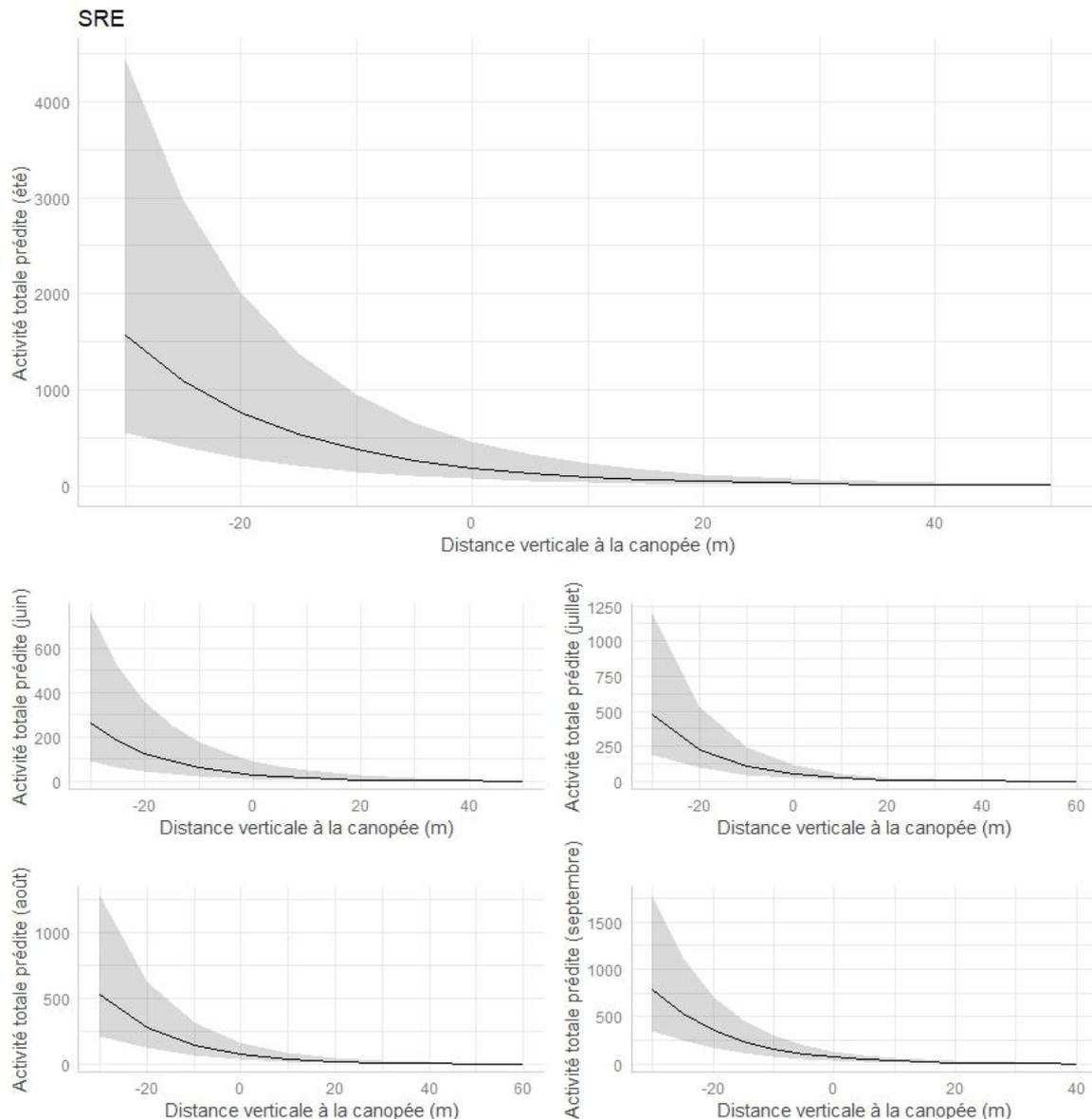


Figure 21: Activité prédite de la guildes des SRE en fonction de la distance verticale à la canopée. R^2 (supérieur) : 0,79 ; R^2 (gauche à droite) : 0,80 ; 0,84, 0,84 ; 0,63.

4.3.5 Activité chiroptérologique (sol et altitude) en fonction de la distance horizontale à la lisière forestière et la hauteur par rapport au sol.

Les modèles suivants ont mis en évidence une série d'effets significatifs de hauteur par rapport au sol sur l'activité chiroptérologique.

En effet, l'activité des guildes des MRE et des SRE est influencée négativement par la hauteur par rapport au sol et ce, pour chacune des périodes considérées. La distance horizontale influence également de manière significative l'activité du groupe des LRE en juin et juillet. Cette tendance s'observe également en été, de manière non-significative.

On notera également la présence d'une tendance négative de l'effet de la distance horizontale à la lisière forestière sur l'activité de la guide des MRE en août.

Tableau 11 : Récapitulatif des effets des variables explicatives des modèles contenant la distance à la lisière (Dh) et la hauteur du micro au-dessus du sol (Hs). Effet significatif : *(vert) ; tendance : .(jaune) .

Guilde		Juin		Juillet		Août		Septembre		Eté	
		Coeff.	p-val.	Coeff.	p-val.	Coeff.	p-val.	Coeff.	p-val.	Coeff.	p-val.
MRE	Dh	-0,001	0,792	-0,002	0,478	-0,009	0,066 .	-0,004	0,333	-0,001	0,587
	Hs	-0,020	<0,001*	-0,027	<0,001*	-0,037	<0,001*	0,183	<0,001*	-0,027	<0,001*
LRE	Dh	-0,002	0,676	-0,001	0,817	-0,009	0,155	-0,001	0,871	-0,003	0,549
	Hs	-0,022	0,001*	-0,018	<0,001*	-0,008	0,253	-0,005	0,377	-0,013	0,057.
SRE	Dh	-0,010	0,118	-0,009	0,128	-0,009	0,142	-0,004	0,310	-0,006	0,351
	Hs	-0,072	<0,001*	-0,076	<0,001*	-0,066	<0,001	-0,082	<0,001	-0,072	<0,001*

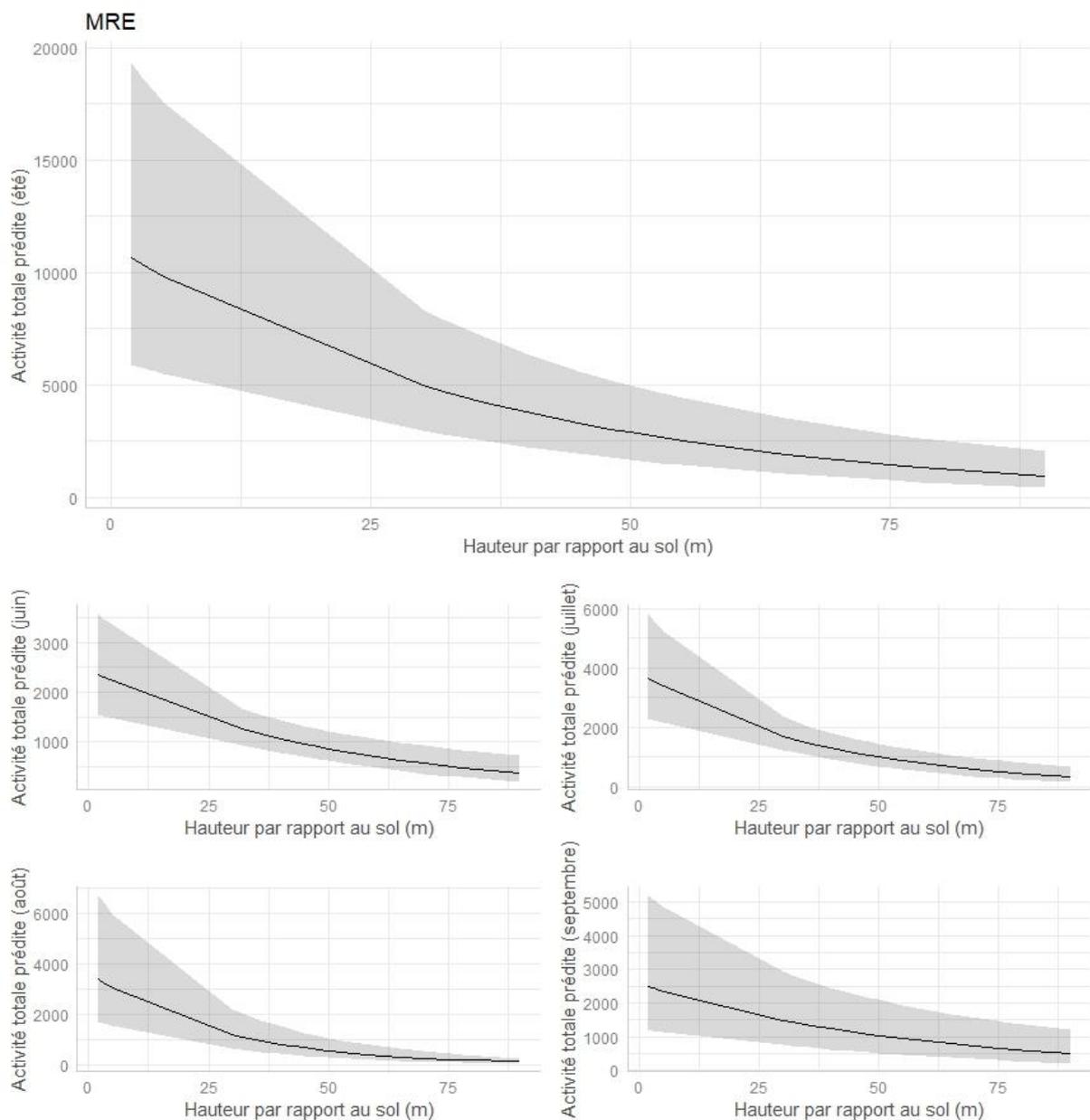


Figure 22: Activité prédite de la guilde des MRE en fonction de la hauteur par rapport au sol. R^2 (supérieur) : 0,63 ; R^2 de gauche à droite : 0,30 ; 0,32 ; 0,79 ; 0,59

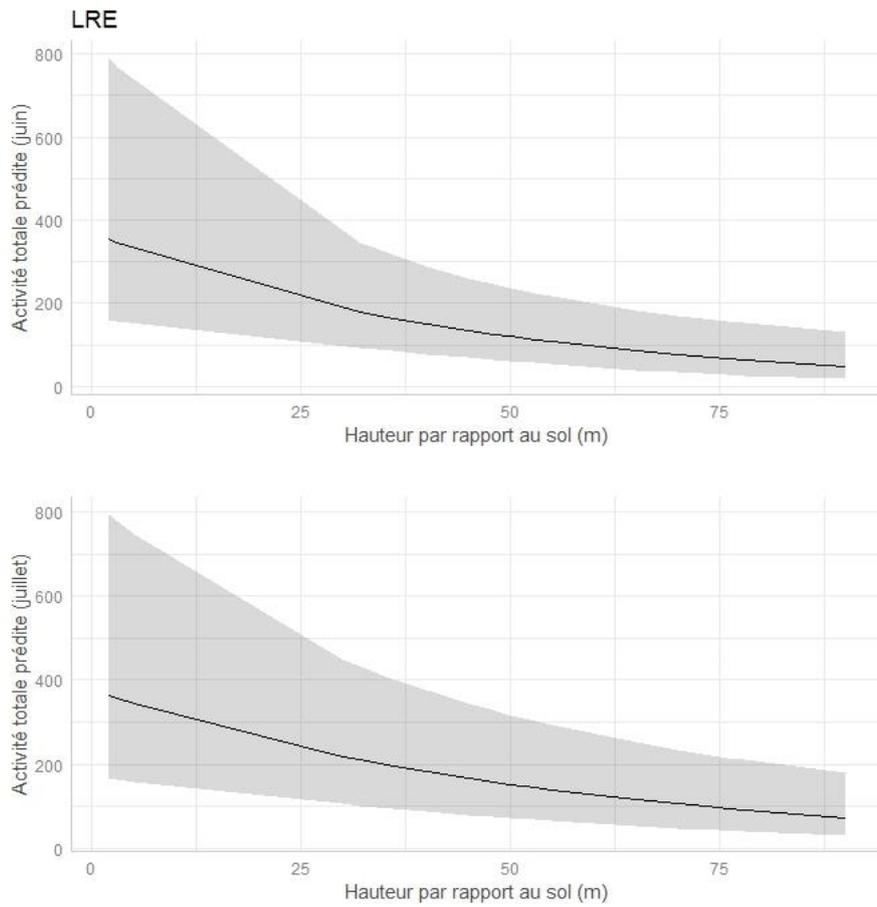


Figure 23: Activité prédite de la guildes des LRE en fonction de la hauteur par rapport au sol. R^2 (haut) : 0,57 ; R^2 (bas) : de gauche à droite : 0,73.

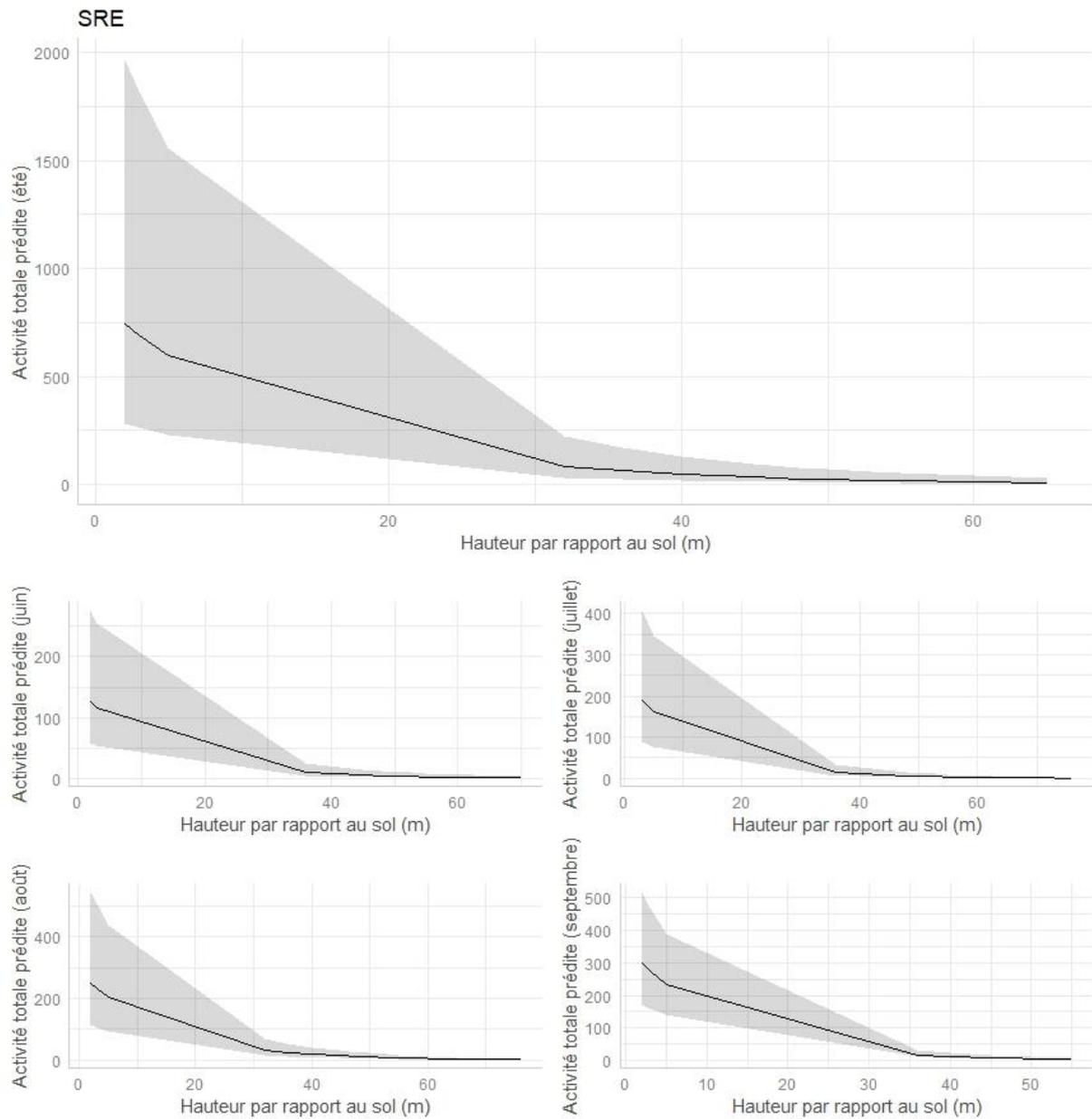


Figure 24: Activité prédite de la guildes des SRE en fonction de la hauteur par rapport au sol. R^2 (supérieur) : 0,71 ; R^2 de gauche à droite : 0,70 ; 0,80 ; 0,81 ; 0,63.

5 Discussion

5.1 Résultats et limites de l'analyse des points d'écoute

Cette analyse basée sur 199 PE réalisés en Wallonie entre 2014 et 2021 a permis de mettre en évidence un effet de la distance à la lisière forestière sur l'activité chiroptérologique mesurée au niveau du sol. Cet effet n'est significatif que lorsque l'analyse se limite aux PE situés à moins de 200 m des lisières. Ce résultat suggère qu'au-delà de 200 m, la répartition spatiale des chauves-souris n'est plus guidée par la proximité d'une forêt ou du moins pas suffisamment pour que cela se marque au niveau statistique).

L'effet de la distance aux forêts est mieux mis en évidence lorsque la distance à la lisière forestière est traitée comme une variable catégorielle et non comme une variable continue. Cela résulte probablement du fait que l'activité ne décroît pas de manière continue sur plusieurs centaines de mètres à partir des lisières, mais qu'il existe un seuil au-delà duquel l'activité est relativement stable et nettement plus faible qu'à proximité de la lisière. Notre analyse des données de points d'écoute en Wallonie suggère que ce seuil, pour toutes les espèces confondues, se situe entre 45 et 165 m ou entre 35 et 100 m, en fonction du jeu de données testé.

Il est important de préciser que si cet effet a bien été observé et est significatif, il n'explique qu'une très faible part de la variabilité de l'activité des chauves-souris mesurée en Wallonie via les points d'écoute analysés. Ainsi, les deux modèles continus qui ont été construits à l'aide d'un grand nombre de variables explicatives environnementales n'expliquent que 31 à 34 % de la variance de l'activité mesurée aux points d'écoute. Parmi cette part de la variabilité expliquée par les modèles, 20 % (jeu de données complet) et 50 % (jeu de données réduit aux PE situés à moins de 200 m des lisières) est expliquée par les variables environnementales. Le reste est attribué aux « effets aléatoires » que nous avons rassemblés dans un champ où était écrit le nom du projet. Ces « effets aléatoires » ressemblent un grand nombre d'effets potentiels : l'effet du site, l'effet de l'année d'enregistrement, l'effet de l'heure à laquelle chaque point d'écoute a été mesuré, l'effet des conditions météorologiques, etc. Autrement dit, **l'activité des chauves-souris mesurée par le protocole des points d'écoute de 5 minutes ne peut pas être fidèlement prédite par les variables environnementales que nous avons explorées, y compris par la distance aux lisières.**

Cette faible robustesse des résultats s'explique probablement par la répartition inégale des PE et par la grande variabilité de l'activité mesurée à chaque PE. En effet, contrairement à la plupart des études scientifiques, la présente étude se base sur un jeu de données qui n'est pas le fruit d'un design expérimental. La répartition très hétérogène des PE par rapport aux lisières, en particulier leur concentration dans les 20 premiers mètres, réduit forcément la puissance de calcul. Concernant la variabilité, les enregistrements au niveau des différents PE ont été réalisés sur plusieurs années, les différents sites n'ont pas été visités les mêmes nuits ou encore les PE n'ont pas été inventoriés à chaque reprise à la même heure. Dès lors, l'effet aléatoire représenté par la variable « projet » rassemble beaucoup de facteurs non-mesurables. De plus, l'activité chiroptérologique provient de PE d'une durée de cinq minutes. Une mesure de l'activité durant 5 min reproduite 12 fois sur l'année, permet-elle vraiment de mesurer précisément l'activité des chauves-souris à un endroit ? Les résultats obtenus permettent d'en douter. Le jeu de données aurait probablement été plus robuste si les enregistrements avaient été plus longs, par exemple au moins une nuit d'enregistrement complète à chaque visite d'un PE.

L'analyse bibliographique a montré que l'effet de la distance aux lisières est largement documenté pour les espèces chassant plus ou moins régulièrement à proximité les éléments ligneux comme les pipistrelles, les murins ou les oreillards. Dans le cas de notre étude sur les points d'écoute, la pipistrelle commune représente 89,7 % de l'activité enregistrée. Nous pouvons donc affirmer que nos résultats

reflètent principalement le comportement de la Pipistrelle commune, et pas nécessairement celui des autres espèces. Pour cette dernière, les études précédentes ont montré que l'activité au sol diminue de 40 à plus de 90 % entre l'élément ligneux (haie ou forêt) et un point de mesure situé en milieu ouvert éloigné d'environ 50 m (Kelm et al., 2014 ; Heim et al., 2018 ; Leroux et al., 2022). Ce seuil situé aux environs de 50 m dans la littérature pour la pipistrelle commune est compatible avec les intervalles de distance mis en évidence en Wallonie par cette étude (45-165 m et 35-100 m).

5.2 Résultats et limites de l'analyse des inventaires en continu

L'analyse des enregistrements sur 13 mats de mesures, réalisés entre 2 m et 90 m au-dessus du sol et entre 10 et 180 m de la lisière la plus proche, a montré une grande variabilité d'activité entre les sites. Cette variabilité n'est que partiellement expliquée par les 4 mesures de distances que nous avons investiguées.

De manière similaire à ce qui a été avancé au point précédent, nous insistons d'abord sur la faiblesse du jeu de données utilisés pour ce volet. En effet, le nombre restreint de sites d'enregistrements en continu utilisables dans le cadre du marché public (n=13) rend vite discutable toute analyse statistique. En revanche, contrairement aux données issues des PE, les périodes d'enregistrements analysées sont très longues (4 mois complets), si bien qu'il est probable qu'elles représentent fidèlement l'activité moyenne des chauves-souris sur chacun des 13 sites et pour les différentes hauteurs.

Malgré ces réserves, des tendances significatives ont pu être observées.

Lorsque l'on analyse l'ensemble des données, ce sont les distances verticales au sol ou à la canopée qui expliquent le plus l'activité des chauves-souris parmi les variables explicatives explorées. Cet effet est constant tout l'été pour les SRE et MRE, et a lieu uniquement en début de l'été pour les LRE. La distance horizontale n'a aucun effet significatif dans cette analyse. Ce résultat est assez logique au vu de l'écologie des SRE et des MRE. Pour elles, le gradient vertical depuis le sol est l'effet dominant (r^2 entre 0,63 et 0,75) et surtout le plus constant parmi le jeu de données étudié.

A propos de ce gradient vertical d'activité depuis le sol, on notera que la variabilité de l'activité au sol est très élevée au sein des 3 groupes, ce qui rend les prédictions des modèles imprécises à proximité du sol (large intervalle gris autour de l'estimation moyenne sur les graphiques). Cela témoigne de la grande variabilité de l'activité des chauves-souris d'un site à l'autre, indépendamment des distances aux forêts. Chez les SRE, l'intervalle de confiance est nettement plus faible à partir de 33 m au-dessus du sol, qui correspond à la hauteur du micro « en altitude » le plus bas du jeu de données. Le modèle montre ainsi une diminution systématique de l'activité des SRE d'un facteur 5 à 8 entre l'activité mesurée au sol et celle mesurée autour de 33 m. A l'intérieur de cet intervalle 0 - 33 m, l'absence de micros sur les 13 mats étudiés empêche de connaître précisément l'évolution de l'activité des SRE.

L'effet de la hauteur au-dessus (ou en dessous) de la canopée est similaire à celui de la hauteur au-dessus du sol. Pour les MRE, l'activité moyenne prédite baisse approximativement de 50 % entre la hauteur de la canopée et 25 m plus haut, et de 75 % entre la hauteur de la canopée et 50 m plus haut. Pour les SRE, l'activité prédite chute d'environ 75 % entre hauteur de la canopée et 25 m plus haut, et devient proche de zéro à partir de 40 m. Lorsque l'on analyse uniquement les données en altitude (33 à 90 m), le gradient vertical s'atténue par rapport à l'analyse précédente, et n'est plus significatif que pour les MRE. Un effet de la distance horizontale apparaît pour les SRE au mois de juin uniquement.

Quant on ne s'intéresse qu'aux enregistrements en continu réalisés au sol, le seul effet significatif de l'éloignement à la lisière concerne les SRE. Aucun effet significatif n'est détecté pour les MRE, ce qui semble contradictoire avec les résultats des analyses des PE. De nouveau, les 13 valeurs d'activité mesurées au sol sont extrêmement dispersées et répondent probablement plus à des effets de site ou d'année qu'à des effets de distances aux lisières. Il serait intéressant de répéter l'analyse dans le futur avec un plus grand nombre de mats de mesures pour voir si des effets de lisières plus significatifs peuvent émerger.

Le croisement de nos résultats avec les informations issues de la littérature est réalisé dans la section suivante, avec l'objectif de permettre une analyse du risque lié à un rapprochement entre les éoliennes et les forêts.

5.3 Analyse de risques par rapport à la diminution de la distance entre le mât et les lisières

Sur base des résultats obtenus via l'analyse des points d'écoute et des inventaires en continu en Wallonie, et surtout sur base de la synthèse bibliographique réalisée, une analyse de risque par rapport à la diminution de la distance entre le mât et les lisières et par rapport à la diminution de la distance entre le bas de pales et la végétation est présentée ci-dessous.

Les différences de comportement de vol entre espèces illustrées précédemment rendent peu pertinente une analyse unique de l'activité globale. L'analyse de risque est donc réalisée par groupe d'espèces.

Cette analyse prend la forme de textes de synthèse et de schémas illustrant la répartition de l'activité des chauves-souris à proximité des boisements. Sur ces schémas, une éolienne fictive de 180 m de hauteur totale avec une hauteur de bas de pale de 35 m est représentée à titre indicatif. Le mât de cette éolienne est placé à 100 m de la lisière, pour illustrer la distance minimale actuellement recommandée en Wallonie par le DNF.

Ces schémas ont été réalisés en compilant l'ensemble des informations recueillies présentées dans ce rapport. Lorsque plusieurs sources renseignent des résultats différents, une valeur moyenne a été calculée. Ces schémas représentent des valeurs moyennes, et masquent une grande variabilité entre les sites qui a été mise en évidence dans de nombreuses régions, y compris en Wallonie par la présente étude. Ces schémas doivent donc être considérés comme des ordres de grandeur et ne remplacent en aucun cas la réalisation de mesures sur le terrain.

Les recommandations émises ci-dessous émanent principalement de l'analyse de la littérature (études françaises et allemandes principalement) plutôt que des résultats des analyses statistiques des données acoustiques wallonnes réalisée dans le cadre du présent marché, dont la robustesse est parfois discutable pour les raisons évoquées plus haut.

5.3.1 Noctule commune, noctule de Leisler et sérotine commune

Distance horizontale aux lisières : aussi bien l'analyse des données wallonnes que celle de la littérature scientifique montrent l'absence d'effet systématique de la distance aux forêts sur les niveaux d'activité des noctules, que ce soit près du sol ou en altitude. Cet effet est parfois observé près du sol mais semble varier en fonction des saisons (Heim et al., 2018). Ce constat est assez logique pour des espèces dont les terrains de chasse sont souvent indépendants de l'occupation du sol (similarité avec les martinets et les hirondelles chez les oiseaux). Un effet a été noté sur la sérotine commune (Roemer et al. 2017).

Distance verticale au sol ou à la canopée : les données wallonnes et la littérature scientifique ne montrent pas de gradient régulier et significatif d'activité avec l'altitude chez ces espèces. La seule tendance significative détectée sur les données wallonnes concerne les mois de juin et juillet. Ce constat est de nouveau cohérent avec le comportement de vol. Ces espèces (au moins la noctule commune et la noctule de Leisler, l'information manque pour la sérotine commune) occupent une épaisse couche d'air entre 0 et plus d'un kilomètre au-dessus du sol (Janssen et al. 2019; Roeleke et al. 2016). Le niveau d'activité à hauteur de la nacelle (Reers et al. 2017) ou du bas de pale (Roemer et al., 2017) ne semble pas, en moyenne, dépendant de la présence ou non d'une forêt au pied ou à proximité de l'éolienne.

Canopée : les données wallonnes sont encore trop peu nombreuses pour évaluer précisément l'activité des chauves-souris juste au-dessus de la canopée, à l'écart des lisières et des coupe-feux. Sur base

des travaux allemands, l'activité juste au-dessus de la canopée est en moyenne 1,5 à 2 fois inférieure à celle mesurée dans les trouées pour les LRE et MRE (Ellerbrok et al. 2023).

La figure suivante résume les informations présentées pour les noctules. Concernant la sérotine commune, le fait qu'elle soit dans certaines études regroupées avec les noctules et dans d'autres avec les pipistrelles, qui présentent des gradients verticaux et horizontaux d'activité très différents, rend hasardeuse la réalisation d'une synthèse de ce type.

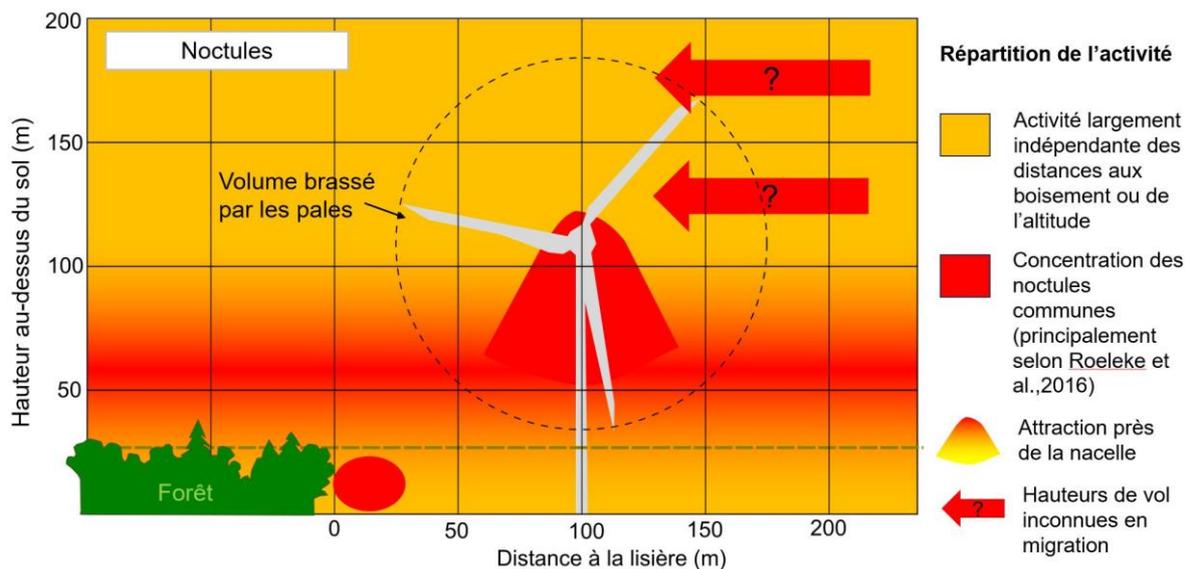


Figure 25 : Répartition relative et schématique de l'activité des noctules à proximité des forêts sur base des informations disponibles dans la littérature (Barré et al. 2023; Janssen et al. 2019; Roeleke et al. 2016; Charlotte Roemer et al. 2019) et sur base de l'analyse de données acoustiques récoltées en Wallonie.

Recommandations : concernant le risque de mortalité par les éoliennes pour ce groupe, la distance horizontale entre les éoliennes et les lisières ne semble pas, à la lumière des informations consultées, un facteur prépondérant pour réduire le niveau de risque. Il reste néanmoins pertinent d'éviter de s'approcher des forêts feuillues dans lesquelles les noctules pourraient établir leur gîte (Reusch et al. 2023). Une adaptation de la hauteur du bas de pale (pour un rotor équivalent) ne semble pas de nature à réduire significativement le niveau de risque (par exemple le passage d'un bas de pale à 20 m à un bas de pale à 30 ou 40 m au-dessus du sol). Le risque de collisions pour ce groupe d'espèces est inhérent à leur comportement de vol (chasse en altitude) et de déplacement (longue migration). Dès lors, cette mesure ne pourra remplacer l'application systématique d'un module d'arrêt adapté aux conditions de vol de ce groupe d'espèces.

Limites : cette recommandation est basée une étude du comportement de vol des noctules communes menée de mai à juillet (Roeleke et al. 2016). Les données disponibles sur la noctule de Leisler montrent qu'elle est capable de suivre le plancton aérien jusqu'à plus de 1 km au-dessus du sol. La distribution des hauteurs de vol des espèces de ce groupe en période de migration (mars-avril et août-octobre) est de plus mal connue, et il n'est pas exclu qu'elle diffère significativement de la distribution en période estivale. Il n'est donc pas garanti que l'application d'un bas de pale ≥ 90 m au-dessus du sol soit une mesure de réduction du risque suffisante pour toutes les espèces du groupe ni en période de migration.

5.3.2 Pipistrelle commune et pipistrelle de Nathusius

Distance horizontale aux lisières : l'analyse des données de points d'écoute en Wallonie a montré une diminution significative de l'activité au sol des chauves-souris (et *de facto* des pipistrelles communes qui représentent 87 % des contacts) au-delà d'une distance aux lisières de l'ordre de 50 m. Plus haut (33-90 m au-dessus du sol), cet effet de la distance horizontale n'est plus significatif lorsqu'on analyse 13 inventaires en continu menés en Wallonie. Les études dans la même gamme de hauteurs utilisant un plus grand nombre d'enregistrement mettent néanmoins en évidence un effet sur la pipistrelle commune et la pipistrelle de Kuhl (Roemer et al. 2017). Plus haut encore, au niveau des nacelles d'éoliennes, cet effet semble imperceptible. Concernant la pipistrelle de Nathusius, la part relative des contacts au sol en milieu ouvert est plus élevée que celle de la pipistrelle commune. Autrement dit, l'activité de la pipistrelle de Nathusius au niveau du sol diminue « moins vite » lorsqu'on s'éloigne des lisières que l'activité de la pipistrelle commune.

Distance verticale au sol ou à la canopée : les enregistrements en continu sur mats de mesure en Wallonie montrent une baisse significative de l'activité lorsqu'on s'éloigne de la canopée (environ -50 % en moyenne entre la canopée et + 25 m). Le gradient vertical ne varie pas, que l'éolienne soit proche ou éloignée des forêts (Roemer et al. 2017). Les données en nacelles à l'écart des forêts montrent que la baisse se poursuit au moins jusqu'à environ 100 m au-dessus du sol (Brinkmann et al. 2011). A notre connaissance, une activité significative (> 1.000 contacts par an) est encore fréquente à 120 m au-dessus du sol, au niveau des nacelles d'éoliennes. Les pipistrelles sont visiblement attirées depuis le sol vers la nacelle de l'éolienne, ce qui explique leur présence même à grande hauteur (Rico et Lagrange 2016). Nous n'avons pas trouvé de données spécifiques concernant les gradients verticaux de la pipistrelle de Nathusius. Pour la réalisation du schéma de synthèse, le même gradient vertical que celui mesuré sur le groupe des MRE en Wallonie (dont la pipistrelle de Nathusius fait partie) a été utilisé, de même que le gradient mesuré précisément en Suisse pour la tranche 0-50 m sur la pipistrelle commune (Wellig et al. 2018). Par rapport à la pipistrelle commune, la possibilité de vols migratoires à grande hauteur doit aussi être prise en compte.

Canopée : les données wallonnes sont encore trop peu nombreuses pour évaluer précisément l'activité des chauves-souris juste au-dessus de la canopée, à l'écart des lisières et des coupe-feux. Sur base des travaux allemands, l'activité juste au-dessus de la canopée est en moyenne 1,5 à 2 fois inférieure à celle mesurée dans les trouées pour les LRE et MRE (Ellerbrok et al. 2023).

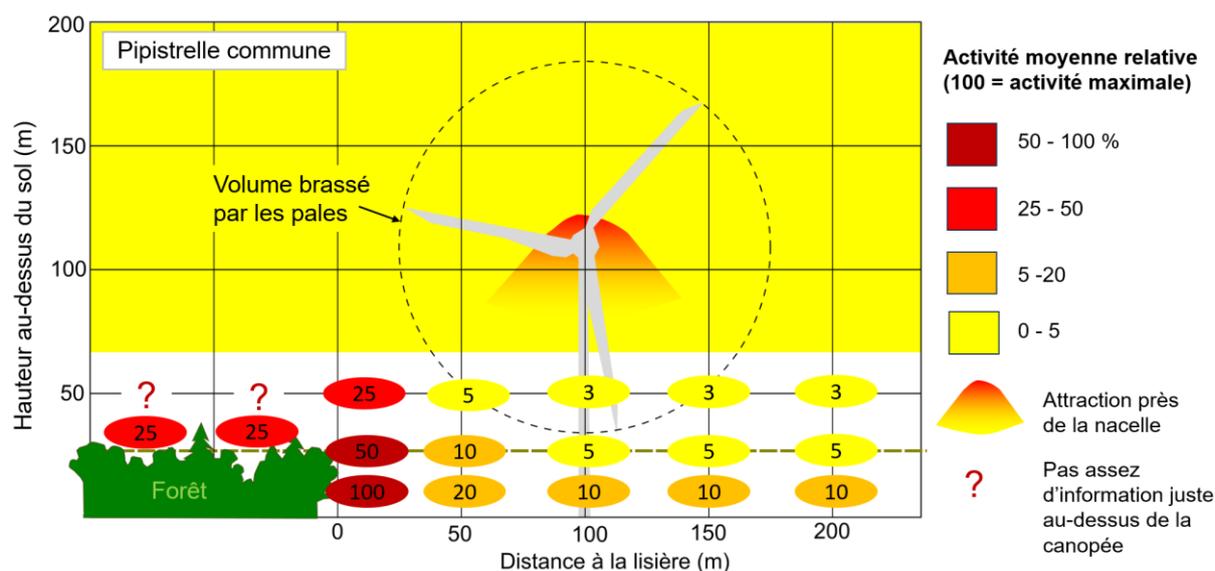


Figure 26 : Répartition relative et schématique de l'activité de la pipistrelle commune à proximité des forêts sur base des informations disponibles dans la littérature (Heim et al. 2018; Kelm et al. 2014; Leroux et al. 2022; Rico et Lagrange 2016; Charlotte Roemer et al. 2019; Wellig et al. 2018) et sur base de l'analyse de données acoustiques

récoltées en Wallonie. Les nombres indiquent l'activité relative approximative (en %) par rapport à l'activité maximale pouvant être mesurée dans le milieu étudié, fixée à 100 %.

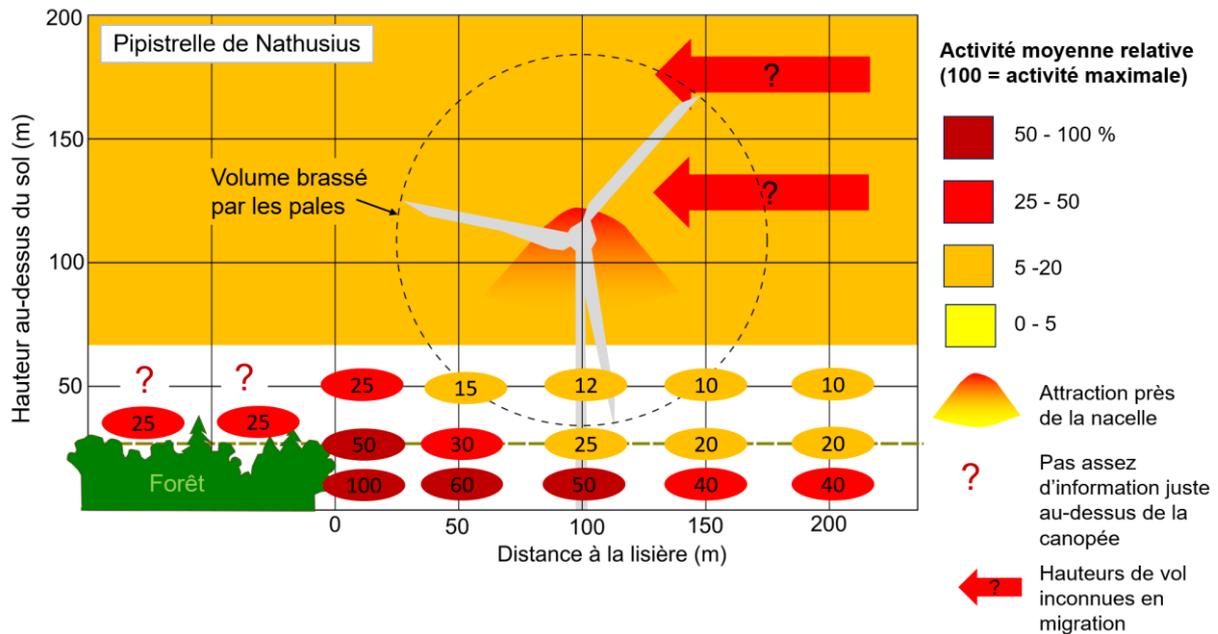


Figure 27 : Répartition relative et schématique de l'activité de la pipistrelle de Nathusius à proximité des forêts sur base des informations disponibles dans la littérature (Heim et al. 2018; Kelm et al. 2014; Leroux et al. 2022; Rico et Lagrange 2016; Charlotte Roemer et al. 2019; Wellig et al. 2018) et sur base de l'analyse de données acoustiques récoltées en Wallonie. Les nombres indiquent l'activité relative approximative (en %) par rapport à l'activité maximale pouvant être mesurée dans le milieu étudié, fixée à 100 %.

Recommandations : concernant la distance à la lisière, le maintien d'une distance de 100 m entre le mat des éoliennes et la lisière la plus proche permet, pour des pales d'une longueur inférieure à 100 m, d'éviter les interactions avec une zone où l'activité est encore élevée, de l'ordre de 25 % de l'activité maximale (voir les deux figures précédentes). Concernant la hauteur du bas de pale, si l'on considère une éolienne dont le mat est situé à au moins 100 m des lisières, et pour des rotors de même diamètre, les informations rassemblées suggèrent que la différence d'impact sur les pipistrelles entre un bas de pale à environ 25 m et un autre à environ 50 m est très faible. Par contre, un bas de pale inférieur à environ 25 m pourrait engendrer un impact significativement plus élevé.

5.3.3 Short-range ecolocators

Distance horizontale aux lisières : l'activité baisse d'un facteur 5 à 10 lorsqu'on s'éloigne d'environ 50 m de la lisière (Kelm et al. 2014; Leroux et al. 2022).

Distance verticale au sol ou à la canopée : les données issues des 16 mats de mesure analysés en Wallonie montrent une diminution d'un facteur 50 du niveau d'activité entre le sol et le micro situé en altitude (hauteur moyenne d'environ 40 m). L'allure détaillée du gradient entre le sol et cette hauteur n'est par contre pas connue en détail à notre connaissance, et varie probablement en fonction des espèces, du relief local, de la distance à la lisière, etc. Au-dessus de 40 m, les données des mats de mesure wallons montrent que l'activité continue à décroître pour être généralement nulle au niveau des micros les plus hauts (75-90 m) ainsi qu'à hauteur des nacelles (données CSD non publiées).

Canopée : l'étude menée en Allemagne sur le sujet ne montre pas de résultats aussi clairs concernant d'éventuels gradients d'activité des SRE que pour les MRE ou les LRE entre la canopée, la limite supérieure de la lisière et le centre d'une trouée forestière (Ellerbrok et al. 2023).

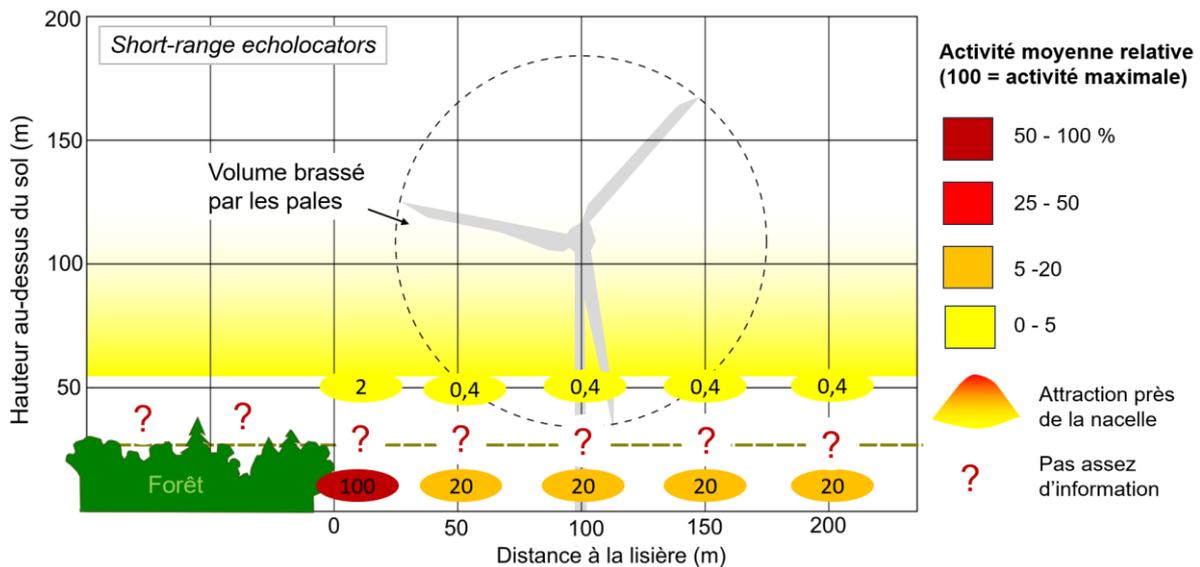


Figure 28 : Répartition relative et schématique de l'activité des short-range echolocators à proximité des forêts sur base des informations disponibles dans la littérature (Heim et al. 2018; Kelm et al. 2014; Leroux et al. 2022; Rico et Lagrange 2016; Charlotte Roemer et al. 2019; Wellig et al. 2018) et sur base de l'analyse de données acoustiques récoltées en Wallonie. Les nombres indiquent l'activité relative approximative (en %) par rapport à l'activité maximale pouvant être mesurée dans le milieu étudié, fixée à 100 %.

Recommandations : ces espèces sont jusqu'à présent considérées comme peu sensibles au risque de collision (Roemer et al. 2017), à l'exception du grand murin, qui fait l'objet d'une étude spécifique dans le cadre du même marché (lot n°2) et qui n'est pas traité spécifiquement ici. Selon la même logique que celle décrite plus haut pour le cas des pipistrelles, les informations rassemblées nous poussent à suggérer de maintenir une distance horizontale de 100 m entre le mat des éoliennes et les lisières si le bas de pale est inférieur à 40-50 m. Dans le cas d'une hauteur de bas de pale plus élevée, un rapprochement des lisières n'est pas jugé susceptible d'augmenter significativement le risque de collision. Néanmoins, les espèces de ce groupe sont considérées comme sensibles à la dégradation de leur habitat en raison d'un effarouchement partiel dans un rayon de plusieurs centaines de mètres autour des éoliennes (Ellerbrok et al. 2022; Gaultier et al. 2023). Pour éviter cet effet, il convient d'éviter l'implantation d'éoliennes à proximité d'habitats spécifiques à ces espèces, en particulier ceux pouvant abriter des gîtes ou des zones de chasse jugées essentielles pour les populations locales. Concernant la hauteur du bas de pale, les données disponibles et les informations que nous avons trouvées ne nous permettent pas d'évaluer précisément quelle serait la différence d'impact entre des modèles ayant une hauteur de bas de pale au-dessus du sol de 30, 25 ou 20 m par exemple (à diamètre de rotor équivalent).

6 Conclusions, recommandations et perspectives

L'analyse des enregistrements réalisés sur 199 points d'écoute montre que l'activité des chauves-souris mesurée au sol dans le cadre des études d'incidences est très variable et s'explique assez mal par les variables environnementales testées. Un effet significatif de la part des forêts dans un rayon de 250 m, de la distance aux lisières, de la densité du réseau de haies et d'alignements d'arbres ainsi que de la pollution lumineuse est néanmoins mis en évidence. Concernant la distance aux lisières, l'activité moyenne toutes espèces confondues baisse significativement au-delà d'une distance de l'ordre de 50 m.

Les données de 13 campagnes d'enregistrements en continu sur mats de mesure ont pu être rassemblées afin d'explorer le rôle de la distance verticale entre les micros et la canopée ou le sol ainsi que celui de la distance horizontale et diagonale à la lisière. Malgré une très grande dispersion des points, des effets significatifs ont été mis en évidence. L'effet principal est une baisse d'activité avec la hauteur. Cet effet est significatif sur toute la saison (juin à septembre) pour les MRE et les SRE, uniquement en juin et juillet pour les LRE. L'activité à hauteur du bas de pale (33-90 m) semble peu influencée par la distance aux lisières. Un effet significatif apparaît uniquement pour les SRE au mois de juin.

Ces résultats issus de l'analyse de données wallonnes, combinée à une analyse détaillée de la littérature scientifique, ont permis de dresser une série de recommandations quant à un éventuel rapprochement des rotors vers les massifs forestiers. Il apparaît que la distance de garde de 100 m aux lisières actuellement appliquée par l'administration semble justifiée au regard de la répartition moyenne dans l'espace de l'activité des chauves-souris.

Concernant la hauteur du bas de pale au-dessus de la végétation, il apparaît pour le cas des éoliennes en forêt que favoriser des éoliennes de grande taille avec des bas de pale situés à plus de 30-40 m au-dessus de la canopée pourrait théoriquement réduire le risque de collision pour la plupart des espèces. Pour le cas des éoliennes en milieu ouvert, les données étudiées ne sont pas suffisamment nombreuses pour mettre en évidence des différences d'impact entre des valeurs de 30, 25 ou 20 m par exemple. Il apparaît néanmoins sur base des données wallonnes qu'au-delà d'environ 40 m, l'activité moyenne des murins est très faible, environ 50 fois inférieure à celle mesurée au sol. Cette distance de 30-40 m entre le bas de pale et la végétation reste cependant insuffisante pour les espèces de haut vol, les noctules en particulier, et ne pourra remplacer l'application systématique d'un module d'arrêt adapté aux conditions de vol des chauves-souris.

Pour aller plus loin dans la compréhension des effets de lisières et de distance au sol et à la canopée, il serait pertinent de multiplier les hauteurs d'enregistrements entre 5 et 35 m au-dessus du sol (hors forêt). En forêt, des enregistrements directement au-dessus de la canopée, par exemple depuis les mats d'éoliennes construites en forêt ou depuis la cime des arbres, apporteraient également des éléments utiles à l'analyse du risque. La question des différences d'attractivité entre les peuplements feuillus, mixtes et résineux mériterait elle aussi d'être étudiée à l'aide d'un design expérimental spécifique.

Il est important de rappeler que les analyses réalisées dans ce rapport visaient à mettre en évidence des tendances moyennes et significatives quant au comportement de vol des chauves-souris à proximité des forêts wallonnes. Ces tendances cachent une grande variabilité entre les sites, qu'il convient de garder en tête et qui justifie la réalisation d'études d'incidences spécifiques pour chaque projet éolien. Enfin, cette étude de risque s'est concentrée sur le risque de mortalité et n'a pas considéré la question de la dégradation de l'habitat par effarouchement. Cette possibilité doit être considérée si l'on envisage de multiplier les parcs éoliens dans ou à proximité des forêts en Wallonie.

7 Bibliographie

Les articles identifiés avec une * sont traités dans la synthèse bibliographique (annexe A).

Azam, Clémentine et al. 2016. « Disentangling the Relative Effect of Light Pollution, Impervious Surfaces and Intensive Agriculture on Bat Activity with a National-Scale Monitoring Program ». *Landscape Ecology* 31(10): 2471-83.

*Barré, Kévin et al. 2018. « Estimating Habitat Loss Due to Wind Turbine Avoidance by Bats: Implications for European Siting Guidance ». *Biological Conservation* 226: 205-14.

*Barré, Kévin et al. 2023. « Drivers of Bat Activity at Wind Turbines Advocate for Mitigating Bat Exposure Using Multicriteria Algorithm-Based Curtailment ». *Science of The Total Environment* 866: 161404.

*Brinkmann, Robert, Olivier Behr, Ivo Niermann, et M. Reich. 2011. « Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen: Ergebnisse eines Forschungsvorhabens ». In *Umwelt und Raum*, Göttingen: Cuvillier.

*Cryan, P., Gorresen, P., Hein, C., Schirmacher, M., Diehl, R., Huso, M., Hayman, D., Fricker, P., Bonaccorso, F., Johnson, D., Heist, K., Dalton, D., 2014. Behavior of bats at wind turbines. PNAS.

Denzinger, Annette, et Hans-Ulrich Schnitzler. 2013. « Bat Guilds, a Concept to Classify the Highly Diverse Foraging and Echolocation Behaviors of Microchiropteran Bats ». *Frontiers in Physiology* 4. <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fphys.2013.00164/abstract> (31 octobre 2023).

Durr, Tobias. 2023. « Fledermäuse in Europa/Bat Fatalities at Wind Turbines in Europe ». <https://lfu.brandenburg.de/lfu/de/aufgaben/natur/artenschutz/vogelschutzswarte/arbeitschwerpunkt-entwicklung-und-umsetzung-von-schutzstrategien/auswirkungen-von-windenergieanlagen-auf-voegel-und-fledermaeuse/> (7 décembre 2023).

*Ellerbrok, Julia S. et al. 2022. « Activity of Forest Specialist Bats Decreases towards Wind Turbines at Forest Sites ». *Journal of Applied Ecology* 59(10): 2497-2506.

Ellerbrok, Julia S. et al, 2023. « Forest gaps around wind turbines attract bat species with high collision risk ». *Biological Conservation* 288: 110347.

Frey-Ehrenbold, Annie, Fabio Bontadina, Raphaël Arlettaz, et Martin K. Obrist. 2013. « Landscape Connectivity, Habitat Structure and Activity of Bat Guilds in Farmland-Dominated Matrices ». *Journal of Applied Ecology* 50(1): 252-61.

Gaultier, Simon P., Thomas M. Lilley, Eero J. Vesterinen, et Jon E. Brommer. 2023. « The Presence of Wind Turbines Repels Bats in Boreal Forests ». *Landscape and Urban Planning* 231: 104636.

*Guest, Emma E. et al. 2022. « An Updated Review of Hypotheses Regarding Bat Attraction to Wind Turbines ». *Animals* 12(3): 343.

*Heim, Olga et al. 2018. « The Relevance of Vegetation Structures and Small Water Bodies for Bats Foraging above Farmland ». *Basic and Applied Ecology* 27: 9-19.

Janssen, René et al. 2019. *Moving far and moving high - GPS tracking of female Leisler's bats in Belgium*.

- *Kelm, Detlev et al. 2014. « Seasonal Bat Activity in Relation to Distance to Hedgerows in an Agricultural Landscape in Central Europe and Implications for Wind Energy Development ». *Acta Chiropterologica* 16.
- Kerbiriou, Christian et al. 2019. « Potentiality of the bat pass duration measure for studies dealing with bat activity ». *Bioacoustics* 28(2): 177-92.
- *Leroux, Camille et al. 2022. « Distance to Hedgerows Drives Local Repulsion and Attraction of Wind Turbines on Bats: Implications for Spatial Siting ». *Journal of Applied Ecology* 59(8): 2142-53.
- Lisein, Jonathan, Hugues Claessens, Samuel Quevauvillers, et Philippe Lejeune. 2022. « FORESTIMATOR : UN NOUVEAU PORTAIL CARTOGRAPHIQUE POUR L'INFORMATION FORESTIÈRE EN WALLONIE ».
- Millon, Lara, Jean-François Julien, Romain Julliard, et Christian Kerbiriou. 2015. « Bat activity in intensively farmed landscapes with wind turbines and offset measures ». *Ecological Engineering* 75: 250-57.
- *Müller, J., Brandl, R., Buchner, J., Pretzsch, H., Seifert, S., Strätz, C., Veith, M., Fenton, B., 2013. From ground to above canopy-Bat activity in mature forests is driven by vegetation density and height. *Forest Ecology and Management* 306, 179–184.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.043>
- Put, Julia E., Lenore Fahrig, et Greg W. Mitchell. 2019. « Bats Respond Negatively to Increases in the Amount and Homogenization of Agricultural Land Cover ». *Landscape Ecology* 34(8): 1889-1903.
- Radoux, Julien et al. 2019. « Improving Ecotope Segmentation by Combining Topographic and Spectral Data ». *Remote Sensing* 11(3): 354.
- *Reers, Hendrick, Hurst, Johanna, Hartmann, Stefanie, et Brinkmann, Robert. 2017. « Bat activity at Nacelle Height Overt Forest ». In *Wind energy and wildlife Interactions conference - Presentations from the CWW2015 conference*, Springer.
- *Reusch, C., Lozar, M., Kramer-Schadt, S., Voigt, C.C., 2022. Coastal onshore wind turbines lead to habitat loss for bats in Northern Germany. *Journal of Environmental Management* 310, 114715. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114715>
- *Reusch, Christine et al. 2023. « Wind Energy Production in Forests Conflicts with Tree-Roosting Bats ». *Current Biology*: S096098222201987X.
- *Richardson, S.M., Lintott, P.R., Hosken, D.J., Economou, T., Mathews, F., 2021. Peaks in bat activity at turbines and the implications for mitigating the impact of wind energy developments on bats. *Sci Rep* 11, 3636. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82014-9>
- Rico, Pauline, et Hubert Lagrange. 2016. Etude de l'impact des parcs éoliens sur l'activité et la mortalité des chiroptères par trajectographie acoustique, imagerie thermique et recherche de cadavres au sol - Contributions aux évaluations des incidences sur l'environnement.
- Rodrigues, L et al. 2014. « Lignes directrices pour la prise en compte des chauves-souris dans les projets éoliens ». Eurobats Publication Series (6).
- Roeleke, Manuel et al. 2016. « Habitat Use of Bats in Relation to Wind Turbines Revealed by GPS Tracking ». *Scientific Reports* 6(1): 28961.
- *Roemer, C., T. Disca, A. Coulon, et Y. Bas. 2017. « Bat Flight Height Monitored from Wind Masts Predicts Mortality Risk at Wind Farms ». *Biological Conservation* 215: 116-22.
- Roemer, Charlotte, Yves Bas, Thierry Disca, et Aurélie Coulon. 2019. « Influence of Landscape and Time of Year on Bat-Wind Turbines Collision Risks ». *Landscape Ecology* 34(12): 2869-81.

- *Rydell, Jens et al. 2010. « Bat Mortality at Wind Turbines in Northwestern Europe ». *Acta Chiropterologica* 12(2): 261-74.
- *Thompson, Maureen et al. 2017. « Factors associated with bat mortality at wind energy facilities in the United States ». *Biological Conservation* 215: 241-45.
- Voigt, Christian C. et al. 2022. « Wind Turbines without Curtailment Produce Large Numbers of Bat Fatalities throughout Their Lifetime: A Call against Ignorance and Neglect ». *Global Ecology and Conservation* 37: e02149.
- Warton, David I. 2022. *Eco-Stats: Data Analysis in Ecology: From t-Tests to Multivariate Abundances*. Cham: Springer International Publishing. <https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-88443-7> (19 septembre 2023).
- *Wellig, Sascha D. et al. 2018. « Mitigating the Negative Impacts of Tall Wind Turbines on Bats: Vertical Activity Profiles and Relationships to Wind Speed » éd. Vanesa Magar. *PLOS ONE* 13(3): e0192493.

Annexe A - Analyse de la littérature scientifique traitant de la distance entre le mât et les lisières, d'une part, et la distance entre le bas de pales et la végétation (herbacée ou ligneuse), d'autre part



MARCHÉ PUBLIC DE SERVICES VISANT À ÉTUDIER L'ACTIVITÉ ET LA MORTALITÉ DES CHAUVES-SOURIS SUR DES PARCS ÉOLIENS FORESTIERS EN WALLONIE

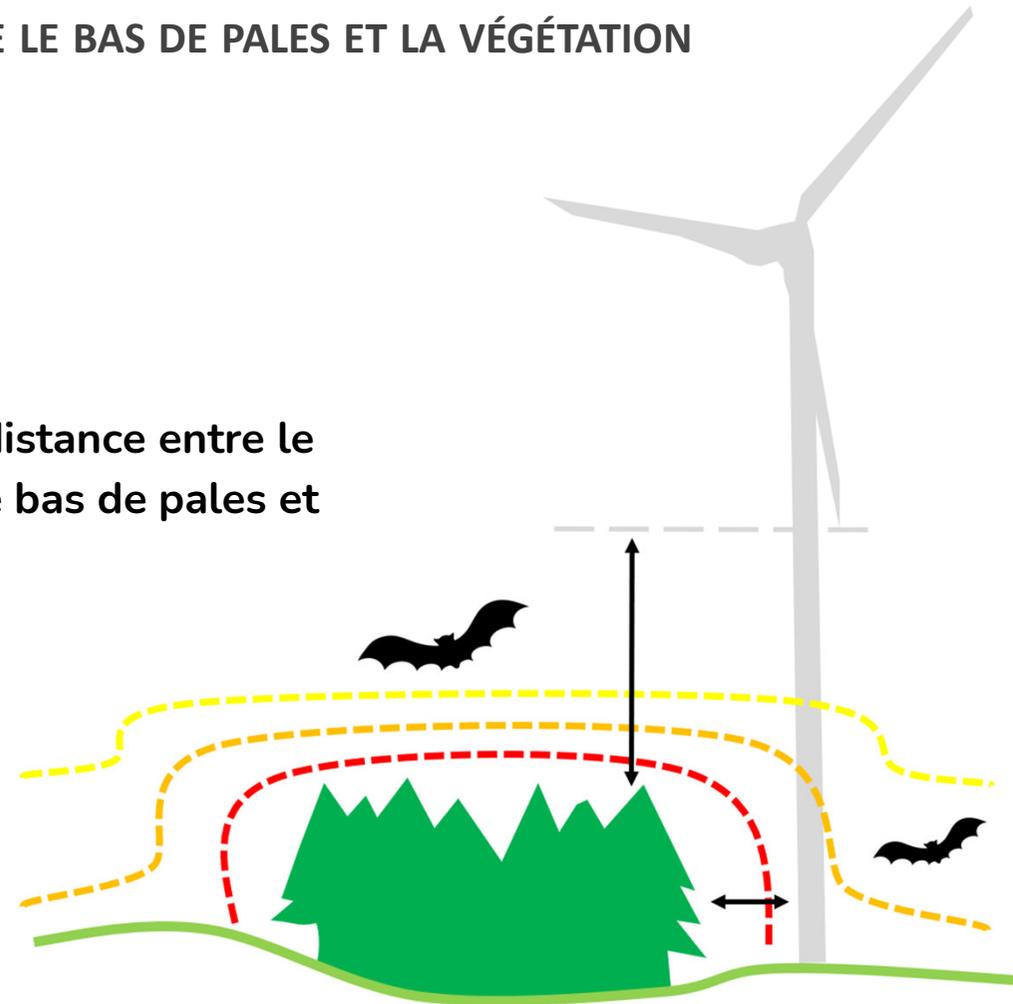
Cahier spécial des charges n°03.02.03-22-3285



LOT 4 - ANALYSE DE RISQUES PAR RAPPORT À LA DIMINUTION DE LA DISTANCE ENTRE LE MÂT ET LES LISIÈRES ET LA DISTANCE ENTRE LE BAS DE PALES ET LA VÉGÉTATION (HERBACÉE OU LIGNEUSE)

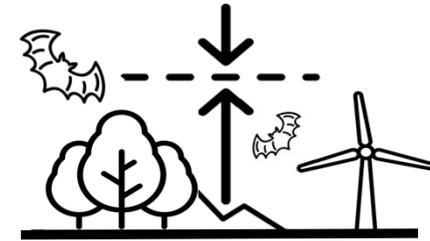
Synthèse bibliographique :

Analyse de la littérature scientifique traitant de la distance entre le mât et les lisières, d'une part, et la distance entre le bas de pales et la végétation (herbacée ou ligneuse), d'autre part





RAPPEL : IMPACT DES ÉOLIENNES



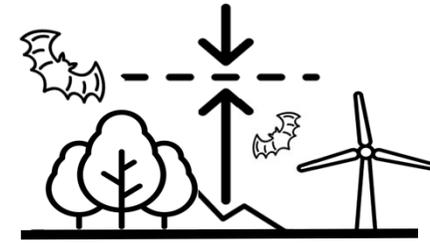
L'impact des éoliennes sur les chauves-souris est très largement dépendant

- des espèces de chauves-souris
 - stratégie de vol, type de chasse
 - comportement migratoire
 - comportement des individus à proximité des éoliennes
- du milieu (paysage, occupation du sol)
- des caractéristiques de l'éolienne
 - hauteur de la nacelle
 - longueur des pales
- de la météo
 - température
 - vitesse de vent
 - précipitation
- de la période
 - date / Saison
 - heure

Et la **perception de l'impact** dépend énormément de la manière de le mesurer !

- type de mesure : détecteur d'ultra-sons, caméra, radar, suivi de mortalité, autre...
- type de détecteur (et de micro) et paramétrage (quand, où, comment ?)
- pré- vs post-implantation

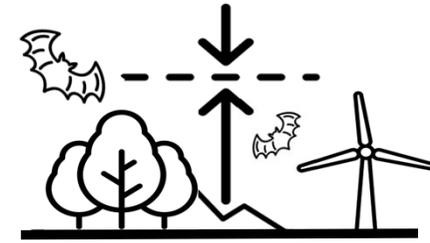
ARTICLES RASSEMBLÉS EN PRIORITÉ SELON LES PROBLÉMATIQUES :



- Perte d'habitat
 - Lisières
 - Haies
 - Autres habitats : agroécosystèmes ; milieux humides
- Mortalité causée par les éoliennes
- Répulsion et/ou attractivité des turbines ~ vent, rotation des pales, période de l'année
- Distance turbines-lisières
- Taille des turbines : hauteur de mât, envergure des pales
- Distinction des guildes de chiroptères : plusieurs manières de séparer les espèces en groupes
- Temporalité : différence de l'effet répulsif au sein des habitats selon la saison (pas/moins d'effet en fin d'été, comportement différent des espèces migratrices en période de migration)
- Attractivité des éoliennes (et facteurs qui l'influencent)



QUELQUES FONDAMENTAUX HORS PROBLÉMATIQUE ÉOLIENNE :



- Objectiver le lien entre l'activité chiroptérologique et
 - **la distance aux lisières forestières**, aux haies ou à d'autres éléments du paysage tels que des milieux humides (mares, côte)
 - **l'altitude**

Distance horizontale aux haies

Kelm et al. (2014)

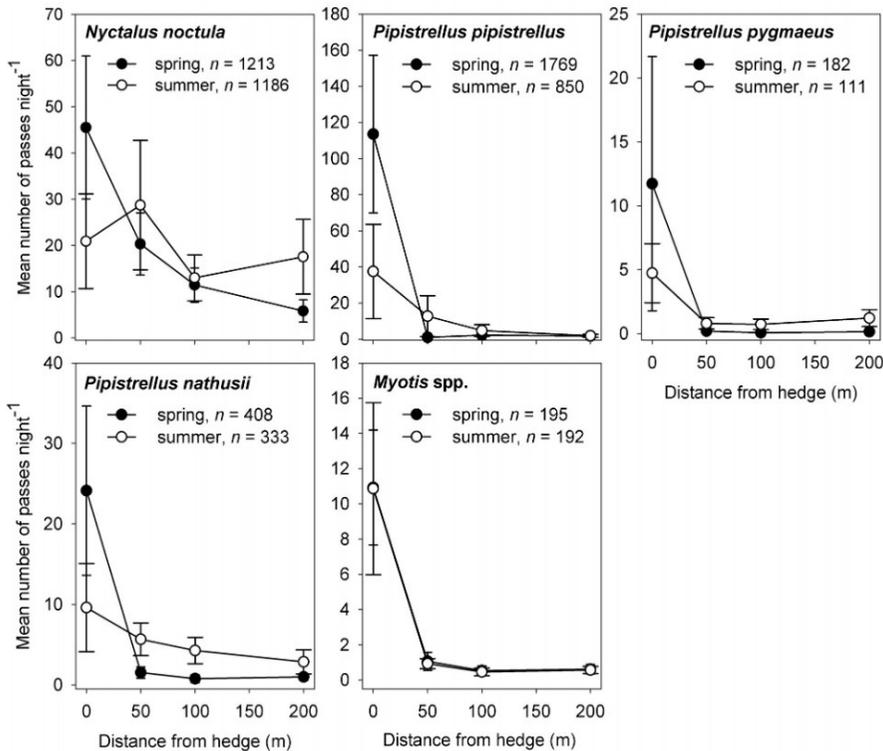


Fig. 1. Number of bat passes per night ($\bar{x} \pm SE$) at different distances from the hedges for four species and one genus of bats in spring (end of April–beginning of July) and summer (end of July–beginning of October)

Méthodo : Inventaire acoustique à différentes distances des haies dans un paysage agricole (NE de l'Allemagne)

Test : activité acoustique ~ distance à la haie, espèce, saison

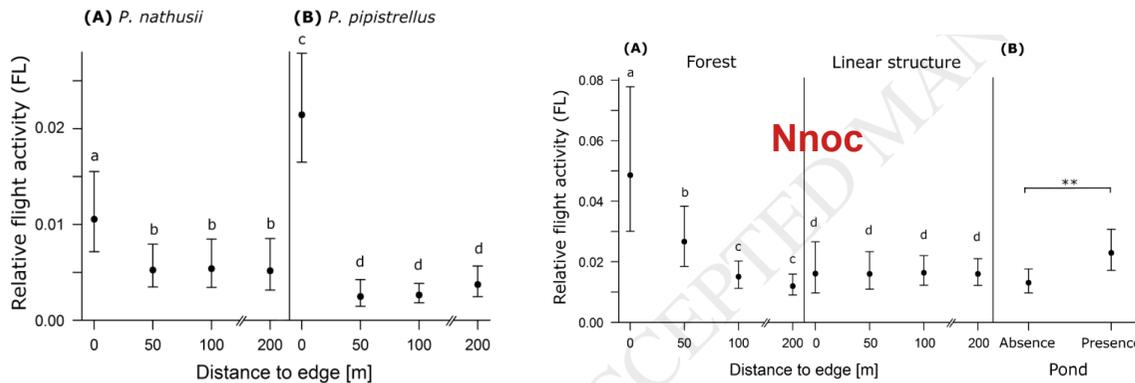
+ la distance à la haie est grande, - l'activité est importante (toutes espèces confondues)

Le déclin majeur de l'activité se passe dans les 50 m depuis la haie.

Cet effet est vrai pour le printemps pour toutes les espèces, mais il est plus faible ou absent pour certaines espèces en été.

Distance horizontale aux lisières et haies + interaction avec la présence de mares

Heim et al. (2018)



Méthodo : Inventaire acoustique en agroécosystèmes en Allemagne
Test : Testé si l'activité des chiro au sein de l'interface lisière-champs (forêt et haies) est influencé par des mares (< 1ha).
Testé l'influence du type de végétation et de la saison.

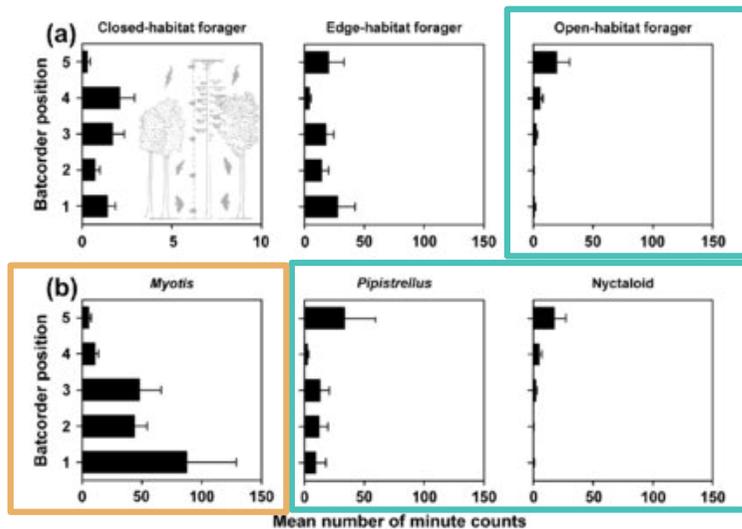
- **Nnoc** et **Ppyg** sont les espèces les plus fréquentes sur l'ensemble des données.
- **Ppip** et **Pnat** sont les espèces les plus actives au niveau des lisières (indépendamment de la présence de mare)
- **Nnoc** : décroissance en s'écartant de la lisière forestière mais pas d'effet distance pour les haies. NB. Effet de la présence de mare.
- Activité de vol et de chasse à plus haute altitude près des lisières qu'en champs!
- Les lisières forestières semblent provoquer une plus grande hausse d'activité de vol et de chasse que les haies pour **Pnat** et **Ppyg**, bien que les deux structures soient clairement importantes pour les chiro d'une manière générale.

Müller, J., Brandl, R., Buchner, J., Pretzsch, H., Seifert, S., Strätz, C., Veith, M., Fenton, B., 2013. **From ground to above canopy-Bat activity in mature forests is driven by vegetation density and height.** Forest Ecology and Management 306, 179–184.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.043>

Hauteur de vol en forêt / encombrement

Müller et al. (2013)



Méthodo : Inventaire acoustique en Allemagne, dans des forêts sans éolienne : mesure de l'activité à 5 hauteurs différentes sur 10 arbres pendant 10 nuits
Test : activité acoustique ~ hauteur dans/au-dessus de la forêt, encombrement par la végétation

+ on est haut, + l'activité des *open-habitat foragers*, des *Nyctaloid* et des *Pipistrellus* est grande
 + on est haut, - l'activité des *Myotis* est grande

Open-habitat foragers = *Eptesicus*, *Nyctalus*, *Vespertilio*, *Pipistrellus nathusii* (+ *P. kuhli* et *Hypsugo*)
Edge-habitat foragers = *Barbastella*, *Myotis daubentoni*, *M. myotis*, *M. mystacinus/brandtii*, *Pipistrellus pipistrellus*
Closed-habitat foragers = *Myotis bechsteini*, *M. nattereri*
 NB : *Nyctaloid* = probablement « sérotules »

Les *open-habitat foragers*, les *Nyctaloid* et les *Pipistrellus* chassent dans les strates supérieures de la forêt, toute la saison. Ces espèces peuvent chasser dans des forêts matures et denses, mais au-dessus de la canopée, ce qui les rend particulièrement vulnérables aux éoliennes en forêt

Müller, J., Brandl, R., Buchner, J., Pretzsch, H., Seifert, S., Strätz, C., Veith, M., Fenton, B., 2013. **From ground to above canopy-Bat activity in mature forests is driven by vegetation density and height.** Forest Ecology and Management 306, 179–184.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.043>



Hauteur de vol en forêt / encombrement

Müller et al. (2013)

- la végétation est encombrée (donc + il y a d'espace libre), + l'activité des *edge-habitat foragers*, des *Myotis* et des *Pipistrellus* est grande

Pour les *edge-habitat foragers* et les *Myotis*, cet effet est indépendant de la hauteur et de la température.

Méthodo : Inventaire acoustique en Allemagne, dans des forêts sans éolienne : mesure de l'activité à 5 hauteurs différentes sur 10 arbres pendant 10 nuits
Test : activité acoustique ~ hauteur dans/au-dessus de la forêt, encombrement par la végétation

Les *edge-habitat foragers* et les *Myotis* ont besoin d'espace libre dans la strate de végétation dans laquelle ils chassent. Ces espèces, qui chassent le long des lisières forestières et dans les forêts, sont capables de localiser leurs proies même avec un espace encombré à l'arrière plan.

Open-habitat foragers = *Eptesicus*, *Nyctalus*, *Vespertilio*, *Pipistrellus nathusii* (+ *P. kuhli* et *Hypsugo*)

Edge-habitat foragers = *Barbastella*, *Myotis daubentoni*, *M. myotis*, *M. mystacinus/brandtii*, *Pipistrellus pipistrellus*

Closed-habitat foragers = *Myotis bechsteini*, *M. nattereri*

NB : *Nyctaloid* = probablement « sérotules »

Cryan, P., Gorresen, P., Hein, C., Schirmacher, M., Diehl, R., Huso, M., Hayman, D., Fricker, P., Bonaccorso, F., Johnson, D., Heist, K., Dalton, D., 2014. **Behavior of bats at wind turbines**. PNAS.

Effet attractif vs répulsif des éoliennes

Cryan et al. (2014)

Méthodo : Caméra thermique, radar et enregistrements ultrasons sur des champs éoliens aux US

Test : tente de décrire des cas de figure de comportement sur base de séquences filmées : interaction avec la nacelle, le mât ou les pales (impacts).

Les chiro sont **déTECTÉS** plus fréquemment par **vent faible** et typiquement approchent les turbines **sous le vent** (càd derrière la nacelle par rapport au sens du vent)

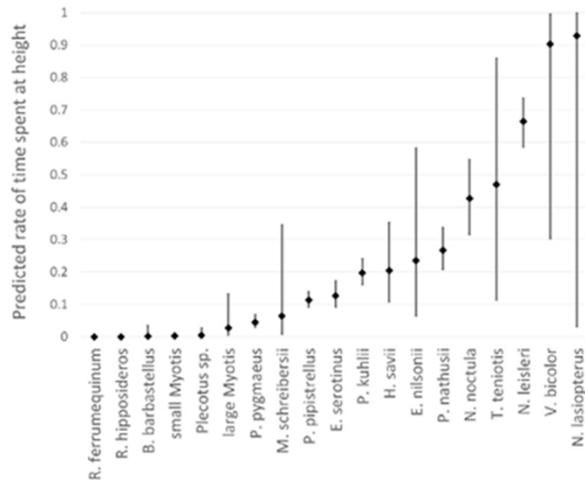
Les patterns d'approche des turbines n'avait pas encore été décrit. Les observations suggèrent que l'**approche volontaire et prolongée**, pour au moins une part des individus (27% approchent de manière répétée de la nacelle), provient de comportements d'**attraction** pour ce qui est pris pour des grands arbres (!?), avec pour conséquence, de la mortalité (collision barotraumatisme), qui n'a toutefois pas été clairement observée lors de cette étude.

e.a. Espèces américaines *Lasiurus* spp.

Roemer, C., Disca, T., Coulon, A., Bas, Y., 2017. **Bat flight height monitored from wind masts predicts mortality risk at wind farms**. Biological Conservation 215, 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.09.002>

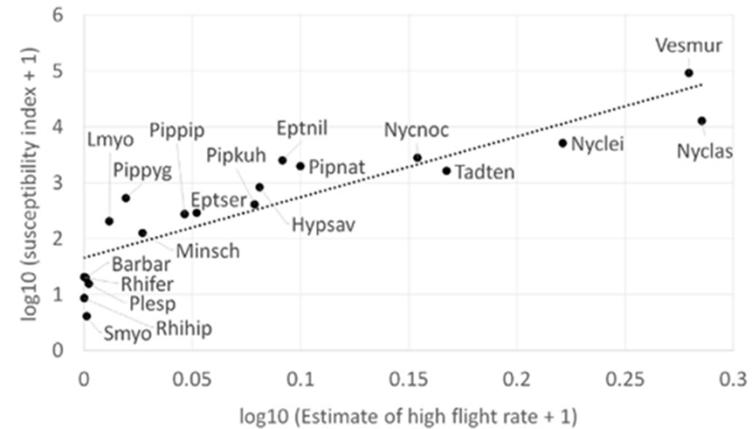
Lien altitude de vol / mortalité

Roemer et al. (2017)



Estimation du pourcentage du temps passé en altitude pour chaque espèce

Cette étude démontre que le risque de mortalité pour une espèce est directement corrélé au pourcentage du temps de vol passé en altitude



Corrélation entre l'indice de susceptibilité d'une espèce à l'éolien et le temps passé en altitude

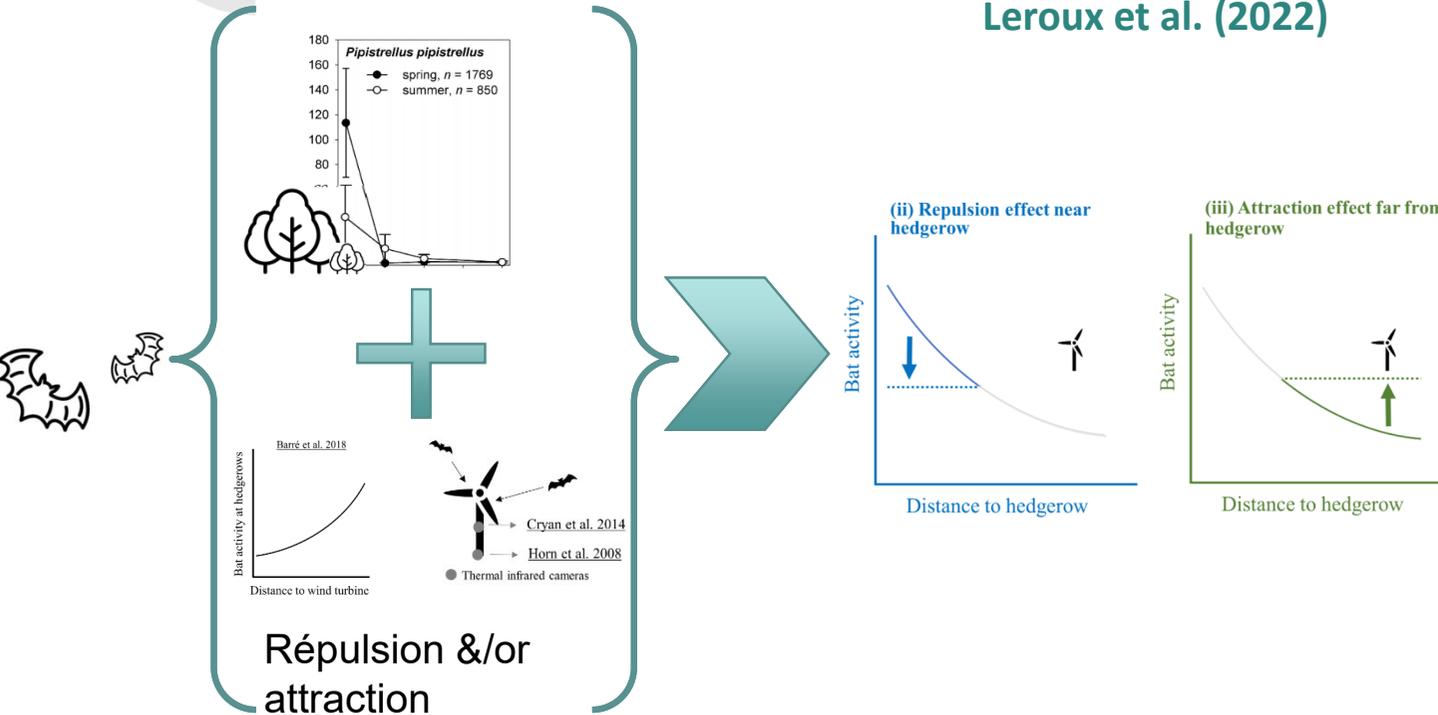
Large Myotis / Lmyo = *Myotis myotis* + *Myotis blythii*
 Small Myotis / Smyo = tous les autres *Myotis*

L'indice de susceptibilité est un calcul qui prend en compte la mortalité (nombre de cadavres trouvés par recherche de cadavres sous les éoliennes (données rassemblées par Eurobats)), qui sont divisés par un indice de densité de contacts (activité moyenne (cf Actichiro)/distance de détection).

Leroux, C., Kerbiriou, C., Le Viol, I., Valet, N., Barré, K., 2022. **Distance to hedgerows drives local repulsion and attraction of wind turbines on bats: Implications for spatial siting.** *Journal of Applied Ecology* 59, 2142–2153. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14227>

Distance horizontale aux haies

Leroux et al. (2022)



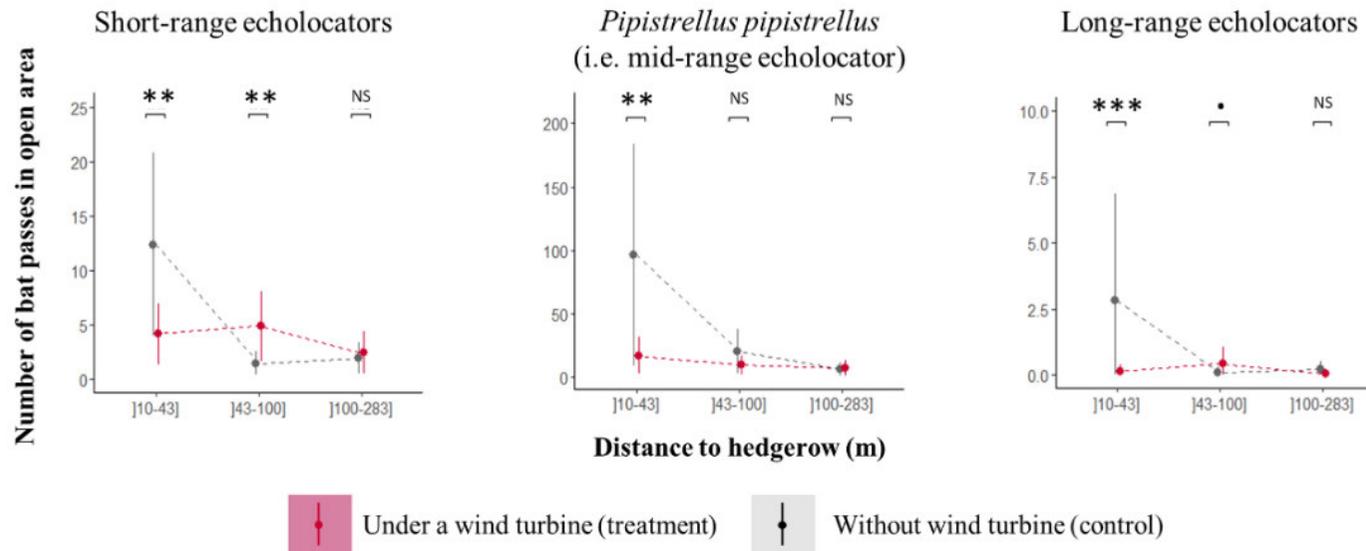
Méthodo : Gros jeu de données d'inventaire acoustique en France avec paramètres mesurés de distance aux éoliennes et aux haies
Test : (1) réduction de l'activité en s'éloignant d'une haie (cf. Kelm et al. 2014 et Heim et al. 2017)
 (2) Mise en évidence d'un effet répulsif des éoliennes au niveau des haies
 (3) Mise en évidence d'un effet attractif loin des haies

Short-range echolocators (SRE): *Myotis* spp., *Barbastella barbastellus* and *Plecotus* spp.
 Mid-range echolocators (MRE): *Pipistrellus* spp.
 Long-range echolocators (LRE): *Nyctalus* spp. and *Eptesicus serotinus*

Distance horizontale aux haies

Leroux et al. (2022)

(a) Results about bat activity related to distance from hedgerows

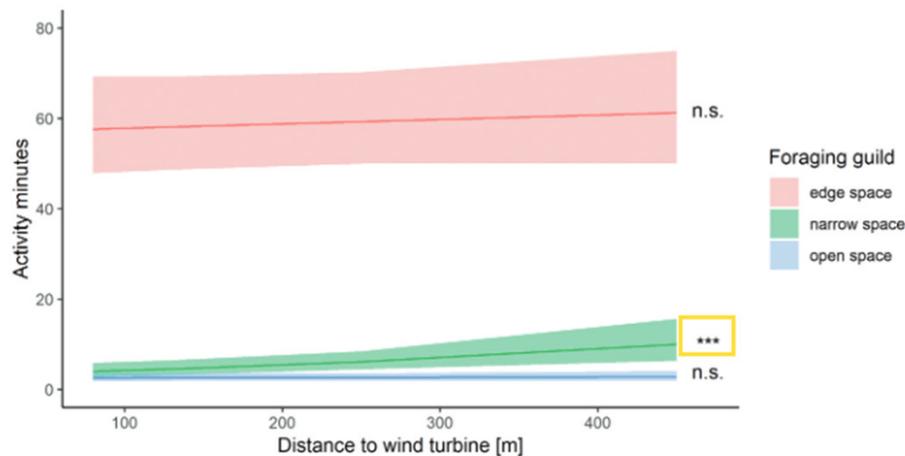


- **D**écroissance de l'activité en s'éloignant des haies mais pas d'effet différent entre 43-100m et 100-283m
- L'activité des SRE, Ppip et LRE pour la classe 10-43m est réduite significativement d'un facteur 3, 5,6 et 18,6 respectivement.
- Un **effet négatif global** (sans distinction de classes de distance) a été relevé **uniquement pour Ppip**.

Ellerbrok, J.S., Delius, A., Peter, F., Farwig, N., Voigt, C.C., 2022. **Activity of forest specialist bats decreases towards wind turbines at forest sites**. Journal of Applied Ecology 59, 2497–2506. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14249>

Distance éolienne / forêt

Ellerbrok et al. (2022)



Méthodo : Inventaire acoustique dans 24 forêts tempérées du centre de l'Allemagne.

Test : activité acoustique ~ vent, distance à l'éolienne, taille du rotor, structure de la végétation, saison

L'activité des *edge-space foragers* ne change pas avec la distance à l'éolienne

L'activité des *narrow-space foragers* est diminuée de moitié pour les points les plus proches de l'éolienne (80m) par rapport aux points à 450 m de distance.

Cet effet distance est présent au printemps et en été, mais pas en fin d'été.

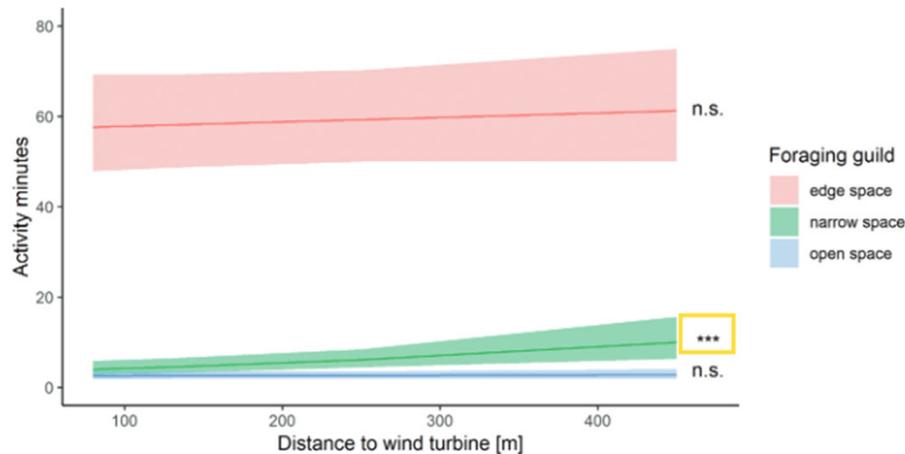
Narrow-space foragers = *Myotis* + *Plecotus*
Edge-space foragers = *Pipistrellus* + *Barbastella*

Ellerbrok, J.S., Delius, A., Peter, F., Farwig, N., Voigt, C.C., 2022. **Activity of forest specialist bats decreases towards wind turbines at forest sites**. Journal of Applied Ecology 59, 2497–2506. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14249>



Taille du rotor

Ellerbrok et al. (2022)



Méthodo : Inventaire acoustique dans 24 forêts tempérées du centre de l'Allemagne.

Test : activité acoustique ~ vent, distance à l'éolienne, taille du rotor, structure de la végétation, saison

L'activité des *edge-space foragers* ne change pas avec la distance à l'éolienne ni avec la taille du rotor

L'activité des *narrow-space foragers* est diminuée de moitié pour les points les plus proches de l'éolienne (80 m) par rapport aux points à 450 m de distance.

Cette diminution d'activité est seulement présente pour les éoliennes avec un **rotor > 93m de diamètre**

Cet effet distance est présent au printemps et en été, mais pas en fin d'été.

Narrow-space foragers = *Myotis* + *Plecotus*
Edge-space foragers = *Pipistrellus* + *Barbastella*

Ellerbrok, J.S., Delius, A., Peter, F., Farwig, N., Voigt, C.C., 2022. **Activity of forest specialist bats decreases towards wind turbines at forest sites**. Journal of Applied Ecology 59, 2497–2506. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14249>

Perte d'habitat / structure de végétation

Ellerbrok et al. (2022)

Méthodo : Inventaire acoustique dans 24 forêts tempérées du centre de l'Allemagne.

Test : activité acoustique ~ vent, distance à l'éolienne, taille du rotor, structure de la végétation, saison

L'activité augmente avec l'hétérogénéité (verticale) de la forêt, tant au niveau du sol (2.5m) qu'au niveau de la canopée.

En résumé

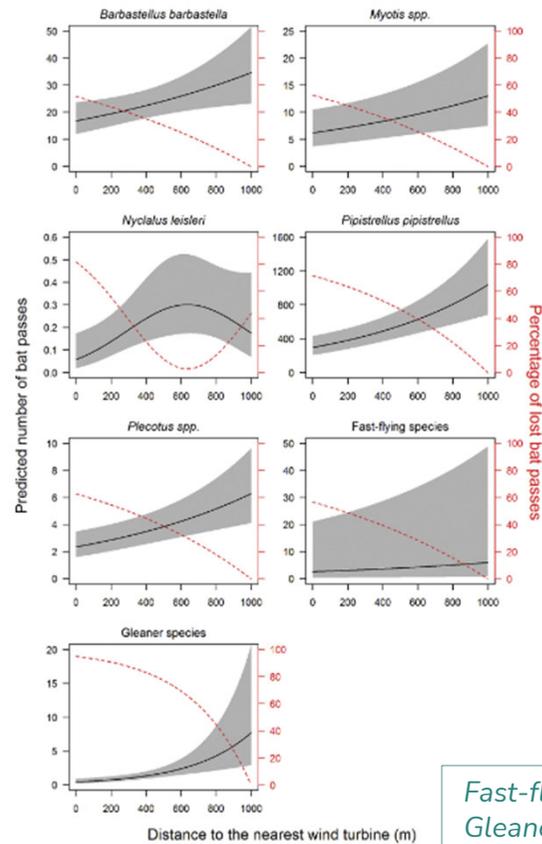
- Les **espèces de milieu fermé** (Myotis et Plecotus) montrent une **perte d'habitat** jusqu'à plusieurs centaines de m autour des éoliennes en forêt, en particulier pour les éoliennes à grand rotor.
- Les éoliennes en forêt n'ont **pas d'effet** sur les Pipistrelles et Barbastelles.
- Pour les **espèces de milieu ouvert** (Eptesicus, Nyctalus, Vespertilio), ils n'ont constaté **aucune différence** à part une certaine attractivité des éoliennes en fin d'été.

Barré, K., Le Viol, I., Bas, Y., Julliard, R., Kerbiriou, C., 2018. **Estimating habitat loss due to wind turbine avoidance by bats: Implications for European siting guidance.** Biological Conservation 226, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.07.011>

Perte d'habitat

Barré et al. (2018)

Méthodo : Inventaire acoustique sur des haies (ouest de la FR) à différentes distances d'éoliennes
Test : activité acoustique ~ distance à l'éolienne et paramètres paysagers



Effet significatif : plus l'éolienne est loin, plus il y a d'activité de chauves-souris pour les espèces/groupes suivants :
 B. barbastellus, Myotis spp., N. leisleri, P. pipistrellus, Plecotus spp., les guildes *fast-flying species* et *gleaner species*

Par contre, pas d'effet détecté pour les espèces communes :
 Eptesicus serotinus, Myotis nattereri, le groupe Pipistrellus kuhlii/nathusii et les espèces rares Rhinolophus hipposideros et R. ferrumequinum

Fast-flying species = Pipistrellus + Barbastella + Eptesicus + Nyctalus
Gleaner species = Plecotus + Rhinolophus + Myotis nattereri

En conclusion, pour la plupart des espèces, un effet négatif (perte d'habitat) est constaté jusqu'à des distances d'au moins 1 km de l'éolienne

Barré, K., Le Viol, I., Bas, Y., Julliard, R., Kerbiriou, C., 2018. **Estimating habitat loss due to wind turbine avoidance by bats: Implications for European siting guidance**. Biological Conservation 226, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.07.011>



Perte d'habitat et lien avec la forêt

Barré et al. (2018)

Méthodo : Inventaire acoustique sur des haies (ouest de la FR) à différentes distances d'éoliennes

Test : activité acoustique ~ distance à l'éolienne et paramètres paysagers

L'activité des *Myotis* spp. est plus importante dans un paysage avec beaucoup de forêts.
Et + il y a de forêts, + la perte d'habitat liée aux éoliennes est marquée.

Thompson, M., Beston, J.A., Etersson, M., Diffendorfer, J.E., Loss, S.R., 2017. Factors associated with bat mortality at wind energy facilities in the United States. *Biological Conservation* 215, 241–245. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.09.014>

Perte d'habitat et lien avec la forêt

Thompson et al. (2017)

Résultat :

- **+ la proportion d'habitats ouverts** (grassland) **diminue, + la mortalité augmente**
 - Explication : les espèces arboricoles sont moins abondantes en milieu ouvert
 - Lien indirect entre couverture forestière et mortalité
- **la majorité des mortalités a lieu entre juillet et octobre et affecte surtout les espèces arboricoles migratrices**

Méthodo : Revue de la littérature sur des données de mortalité nord-américaines et lien mortalité avec différents paramètres

Hauteur de l'éolienne

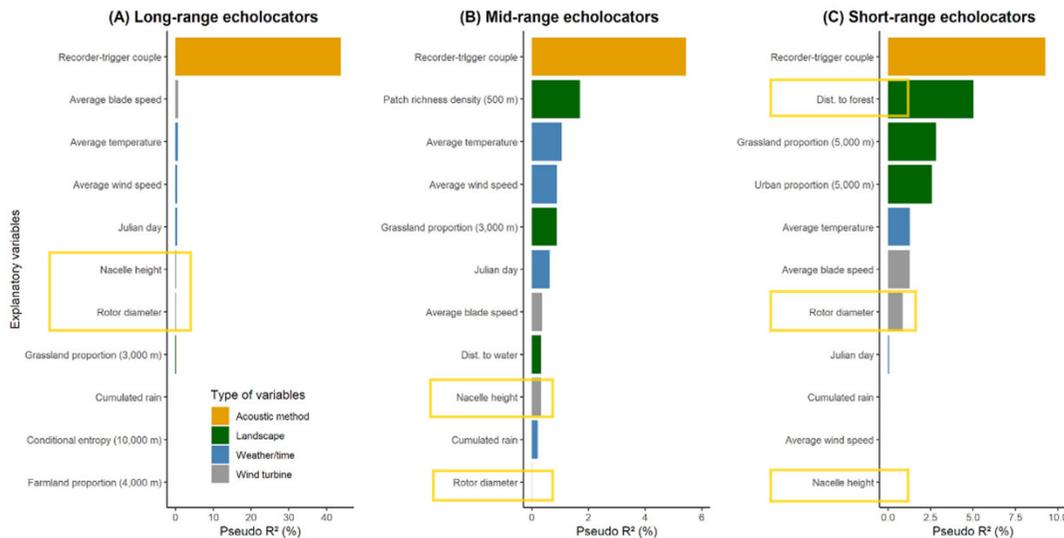
Résultats contradictoires :

+ l'éolienne est grande, + la mortalité est importante
mais d'autres études ne mettent aucun lien
evidence !

Barré, K., Froidevaux, J.S.P., Sotillo, A., Roemer, C., Kerbiriou, C., 2023. **Drivers of bat activity at wind turbines advocate for mitigating bat exposure using multicriteria algorithm-based curtailment.** Science of The Total Environment 866, 161404. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161404>

Distance horizontale à la forêt / dimensions éolienne

Barré et al. (2023)



Méthodo : Rassemblé plein de données acoustiques de toute la FR, avec des micros en nacelle éolienne

Plaidoyer : meilleure efficacité d'un bridage multifactoriel vs basé sur de simple pivots de t° et vitesse de vent

Test : activité des chauves-souris ~ données météo, données paysages, type de détecteur, taille du mat et du rotor, ...

Etude – phase 1 :

1. Le type de détecteur et les paramétrages sont HYPER déterminants (> sélection d'un seul type de détecteur pour la suite).

2. La distance à la forêt est le deuxième facteur explicatif pour les *short-range echolocators*

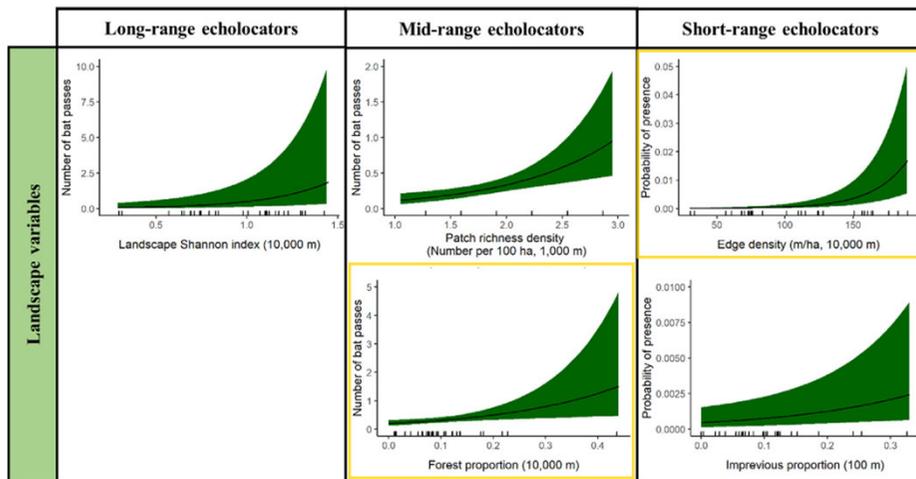
3. La hauteur du mat et la longueur des pales (diamètre du rotor) se trouvent dans le top 10 des facteurs explicatifs les plus importants pour les 3 guildes de chiro étudiées !

Long-range echolocators = *Eptesicus*, *Nyctalus*, *Tadarida*
Mid-range echolocators = *Pipistrellus*, *Hypsugo*, *Miniopterus*
Short-range echolocators = *Barbastella*, *Myotis*, *Plecotus*

Barré, K., Froidevaux, J.S.P., Sotillo, A., Roemer, C., Kerbiriou, C., 2023. **Drivers of bat activity at wind turbines advocate for mitigating bat exposure using multicriteria algorithm-based curtailment.** Science of The Total Environment 866, 161404. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161404>

Distance horizontale à la forêt / dimensions éolienne

Barré et al. (2023)



Etude phase 2 :

4. peu ou pas d'effet des dimensions de l'éolienne (rien de significatif), par contre la vitesse de rotation des pales est importante.

Long-range echolocators = *Eptesicus*, *Nyctalus*, *Tadarida*
 Mid-range echolocators = *Pipistrellus*, *Hypsugo*, *Miniopterus*
 Short-range echolocators = *Barbastella*, *Myotis*, *Plecotus*

Méthodo : Rassemblé plein de données acoustiques de toute la FR, avec des micros en nacelle éolienne

Plaidoyer : meilleure efficacité d'un bridage multifactoriel vs basé sur de simple pivots de t° et vitesse de vent

Test : activité des chauves-souris ~ données météo, données paysages, type de détecteur, taille du mat et du rotor, ...

Etude phase 2 (détecteur et trigger normalisé) :

- + la densité de haies dans un rayon de 10 km est élevée, + l'activité des *short-range echolocators* est grande (significatif)
- + la proportion de forêt dans un rayon de 10 km est élevée, + l'activité des *mid-range echolocators* est grande (significatif)
- + la distance à la forêt est élevée, - l'activité des *long-range echolocators* est grande (non significatif)

Brinkmann, R., Behr, O., Niermann, I., Reich, M., 2011. **Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen: Ergebnisse eines Forschungsvorhabens**, 1. Aufl. ed, Umwelt und Raum. Cuvillier, Göttingen.

IN Jallet, S., 2021. **Éolien terrestre et biodiversité : revue de publications franco-allemande sur l'avifaune et les chiroptères - Note de synthèse.**

Distance horizontale aux forêts / hauteur du mat

Brinkmann et al. (2011) IN Jallet (2021)

Etude : RENBAT I

+ distance des éoliennes aux bosquets/bois augmente,
- l'activité des chauves-souris est grande.

C'est la seule variable paysagère qui semble avoir une influence (bien que faible) sur l'activité des animaux.

+ le mat est grand, - l'activité des chauves-souris est grande (influence faible) (NB L'activité à hauteur de nacelle diminue beaucoup pour une hauteur de moyeu passant de 65 à 100 mètres)

Les stratégies pour éviter les collisions de chauves-souris ne devraient pas se baser sur les seules mesures de distance à certains éléments du paysage, tels que les bois ou bosquets, car nos données montrent que l'impact est nettement plus faible que supposé jusqu'ici.

> Plaidoyer pour un bridage multifactoriel

Reers, H., Hartmann, S., Hurst J. Brinkmann, R., 2017. **Bat Activity at Nacelle Height Over Forest**

IN Köppel, J. (Ed.), 2017. **Wind Energy and Wildlife Interactions**. Springer International Publishing, Cham.

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-51272-3>



Eolienne en forêt : activité à hauteur de nacelle

Reers et al. (2017) IN Köppel (2017)

Résultats :

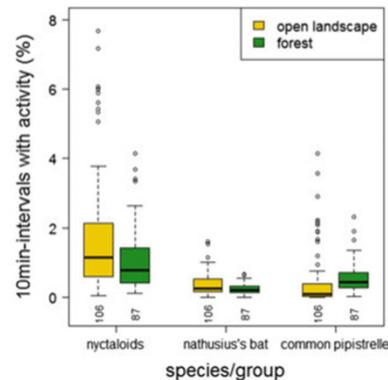
- Les **Nyctaloids** contribuent le plus à l'activité globale, tant en forêts qu'en milieux ouverts
- ***P. nathusii*** présente + d'activité en milieux ouverts qu'en forêts et à l'inverse ***P. pipistrellus*** présente + d'activité en forêts qu'en milieux ouverts

Mais il y a des différences régionales (non significatif)

- Pic d'activité en juillet-sept pour toutes les espèces

Méthode : enregistrements acoustiques au niveau de la nacelle (Allemagne)

Nyctaloids = *Eptesicus*, *Nyctalus*, *Vespertilio*
Pipistrelloids = *Pipistrellus*



Rydell, J., Bach, L., Dubourg-Savage, M.-J., Green, M., Rodrigues, L., Hedenström, A., 2010. **Bat Mortality at Wind Turbines in Northwestern Europe**. Acta Chiropterologica 12. <https://doi.org/10.3161/150811010X537846>



Facteurs de mortalité : paysage, taille de l'éolienne et des pales

Rydell et al. (2010)

Le nombre estimé de chauves-souris tuées / an * turbine est

- assez faible (0-3) dans des plaines ouvertes de basse altitude
- plus élevé (2-5) dans des paysages agricoles plus complexes
- le plus important (5-20) sur les côtes ou sur des crêtes/collines boisées

Parfois, le taux de mortalité augmente localement loin des forêts et des collines, peut-être lorsque les éoliennes sont placées sur des couloir de transit établis ou près de gîtes important.

Méthodo : Review de la littérature et des rapports existants dans le NO de l'Europe pour faire une synthèse des mortalités liées aux éoliennes

Test : nombre de chauves-souris mortes/éolienne ~ espèces, saison, paysage, taille de l'éolienne et météo

La mortalité est étroitement liée aux paramètres de paysages tels que la topographie et la végétation, indépendamment de la région /pays.

1. + le mat est grand, + la mortalité est importante
2. + le diameter du rotor est grand, + la mortalité est importante
3. La mortalité est indépendante de la distance depuis le sol jusqu'au bas de la pale

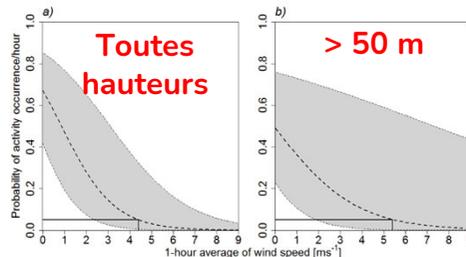
Wellig, S.D., Nusslé, S., Miltner, D., Kohle, O., Glaizot, O., Braunisch, V., Obrist, M.K., Arlettaz, R., 2018. **Mitigating the negative impacts of tall wind turbines on bats: Vertical activity profiles and relationships to wind speed.** PLoS ONE 13, e0192493. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192493>

Profil vertical d'activité → hauteur des éoliennes

Wellig et al. (2018)

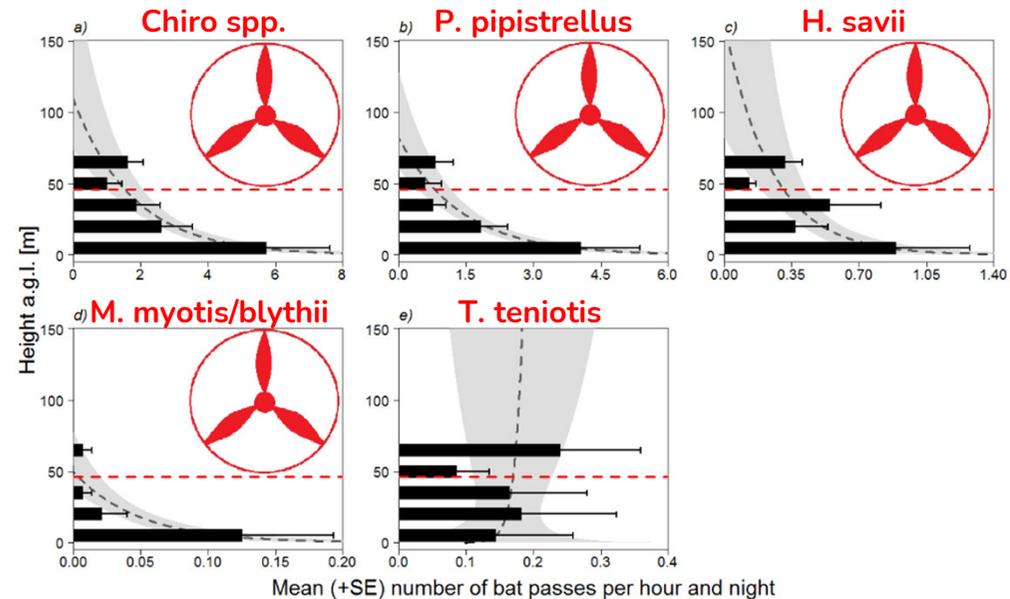
- La majorité de l'activité a lieu à faible hauteur (< 50 m), pour *Chiro spp*, *P. pipistrellus* et *H. savii*
- La majorité de l'activité a lieu à très faible hauteur (< 20 m) pour *M. myotis/blythii*
- 19% de l'activité total (*Chiro spp*) a lieu dans la zone couverte par le rotor (15% pour *P. pipistrellus*, 4% pour *M. myotis/blythii*)

- Par ailleurs, l'activité décroît avec la vitesse de vent
- < 5% de l'activité au-dessus de 4,4m/s (Chiro spp – toutes hauteurs confondues)
- < 5% de l'activité au-dessus de 5,4m/s en hauteur (> 50m)
- Par grand vent, les chauves-souris se rapprochent du sol



Méthodo : Enregistrements sur 2 points (Suisse) à différentes hauteurs, depuis le sol jusqu'à 65m au-dessus du sol

Test : activité ~ hauteur, vitesse de vent



Reusch, C., Paul, A.A., Fritze, M., Kramer-Schadt, S., Voigt, C.C., 2023. **Wind energy production in forests conflicts with tree-roosting bats.** Current Biology. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.12.050>

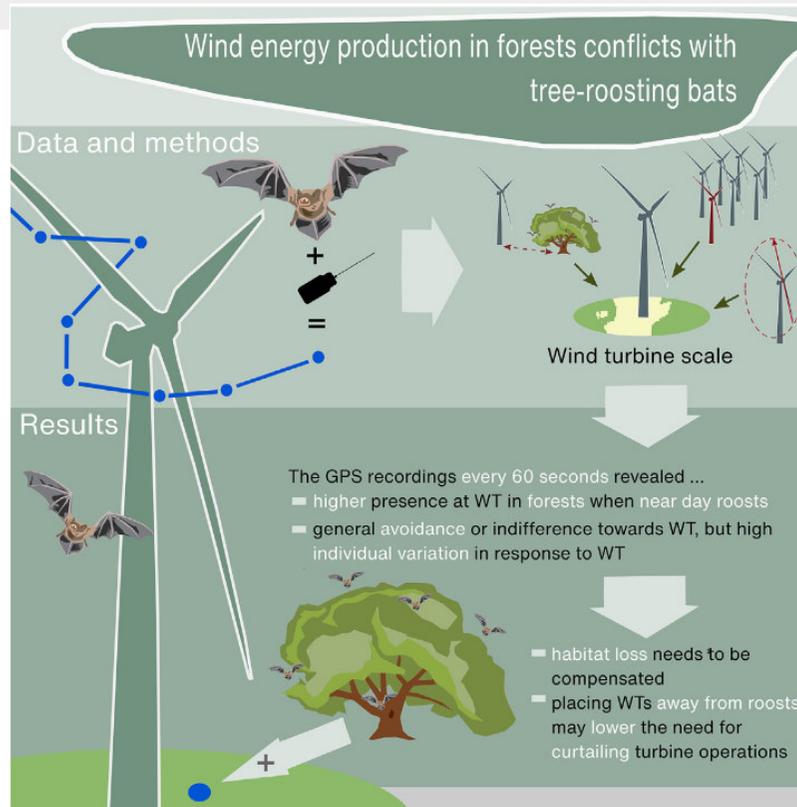
Reusch, C., Lozar, M., Kramer-Schadt, S., Voigt, C.C., 2022. **Coastal onshore wind turbines lead to habitat loss for bats in Northern Germany.** Journal of Environmental Management 310, 114715. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114715>

Attraction

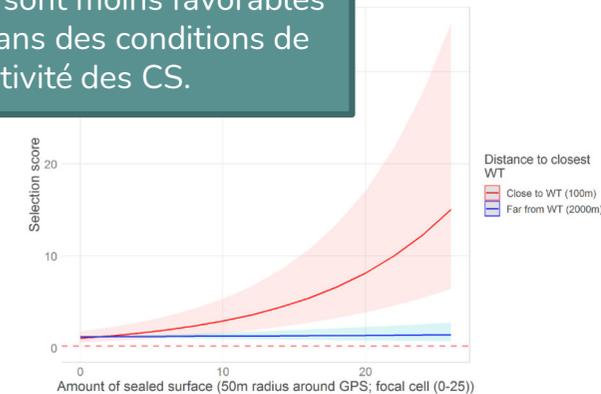
Méthodo : Noctules communes équipées de balises GPS (très intéressant pour le lot 2)

Test : attraction par les turbines en lien avec le contexte environnemental étudié : écosystème forestier (Reusch et al. 2023) ou écosystème côtier (Reusch et al. 2022)

Les chauves-souris sont plus actives au niveau des éoliennes dans les forêts lorsqu'elles sont placées à proximité des **gîtes diurnes**, mais elles évitent les éoliennes sur des distances de plusieurs kilomètres au-delà des gîtes. => peut entraîner un grand nombre de victimes et une perte d'habitat !



3.4 % des positionnements GPS se trouvaient à des distances <100 m de la turbine la plus proche. Pas d'effet noté de la taille du rotor. De plus **grandes éoliennes** sont doublement plus impactantes pour les noctules car (1) plus hautes donc plus dans la zone d'activité des CS et (2) elles sont plus rentables par vent faible donc les producteurs sont moins favorables à le brider dans des conditions de plus forte activité des CS.



Guest, E.E., Stamps, B.F., Durish, N.D., Hale, A.M., Hein, C.D., Morton, B.P., Weaver, S.P., Fritts, S.R., 2022. **An Updated Review of Hypotheses Regarding Bat Attraction to Wind Turbines**. *Animals* 12, 343. <https://doi.org/10.3390/ani12030343>

Facteurs d'attraction des éoliennes pour les chiros

Guest et al. (2022)

Constats :

- CS pas impactées par hasard mais approchent activement des éoliennes, font des allers-retours dans la zone couverte par les pales.
- Activité de pipistrelles + importante au niveau des éoliennes qu'à un point témoin dans un habitat similaire.
- Pic de mortalité en fin d'été/début d'automne, c'est la saison des accouplements et migration automnale.

La relation entre la **mortalité** et la **hauteur** ou les **dimensions** de l'éolienne n'est pas claire

Certaines études suggèrent un effet positif, d'autres une relation pas/peu marquée

Méthodo : (Amérique du Nord) Revue de la littérature concernant l'impact des éoliennes sur les chiros et notamment leur côté attractif

Bruit : attraction des ultrasons peu vraisemblable

Gîte : les éoliennes peuvent être prise pour des arbres (et du coup des gîtes) par les chauves-souris

Site de chasse / eau : concentration d'insectes au niveau des éoliennes (insectes attirés par lumière, chaleur, couleur des éoliennes) → possible activité de chasse

Swarming : hypothèse d'un rôle des éoliennes pour les mâles en parade → pas prouvé à ce stade

Lumière : attractivité dépendante des espèces (pas facteur d'attraction principal)

Odeur : hypothèse d'un marquage olfactif sur certains endroits précise des mâts/nacelles, à vérifier !

Richardson, S.M., Lintott, P.R., Hosken, D.J., Economou, T., Mathews, F., 2021. **Peaks in bat activity at turbines and the implications for mitigating the impact of wind energy developments on bats.** Sci Rep 11, 3636. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82014-9>

Attraction des éoliennes pour les chiros

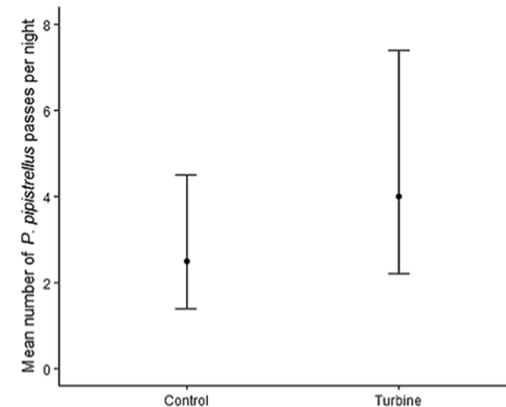
Richardson et al. (2021)

Résultats :

+ grande activité de CS (et de *P. pipistrellus*) au niveau des éoliennes que sur les contrôles
+ grande proportion de *P. pipistrellus* au niveau des éoliennes que sur les contrôles

Conclusion : les chauves-souris sont attirées par les éoliennes

Test : évaluation de l'attraction de 23 parcs éoliens en UK : activité en parc éolien ~ activité à des points contrôle



Marché public de services visant à étudier l'activité et la mortalité des chauves-souris sur des parcs éoliens forestiers en Wallonie

LOT 4 - Analyse de risques par rapport à la diminution de la distance entre le mât et les lisières et la distance entre le bas de pales et la végétation (herbacée ou ligneuse)

Annexe B - Présentation des données relatives aux 13 inventaires en continu sur mats de mesure, au regard des distances au sol, à la lisière et à la canopée

Présentation des données relatives aux 13 inventaires en continu sur mats de mesure, au regard des distances au sol, à la lisière et à la canopée

Auteurs : Louis Casier et Arnaud Beckers

1.1.1 Activité chiroptérologique en fonction du mois

La figure suivante illustre le nombre de contacts par guildes durant la saison d'activité chiroptérologique. Seules les données sans anomalies sont présentées sur cette figure (13 sites). Le pic d'activité n'est pas atteint au même mois pour chaque guildes et il varie également par altitude. Ainsi, concernant la guildes des LRE, le pic d'activité est atteint en août, aussi bien au sol qu'en altitude. Concernant la guildes des MRE, le pic est atteint en juillet au sol et en septembre en altitude. Enfin, pour la guildes des SRE, le pic est atteint en août, aussi bien au sol qu'en altitude.

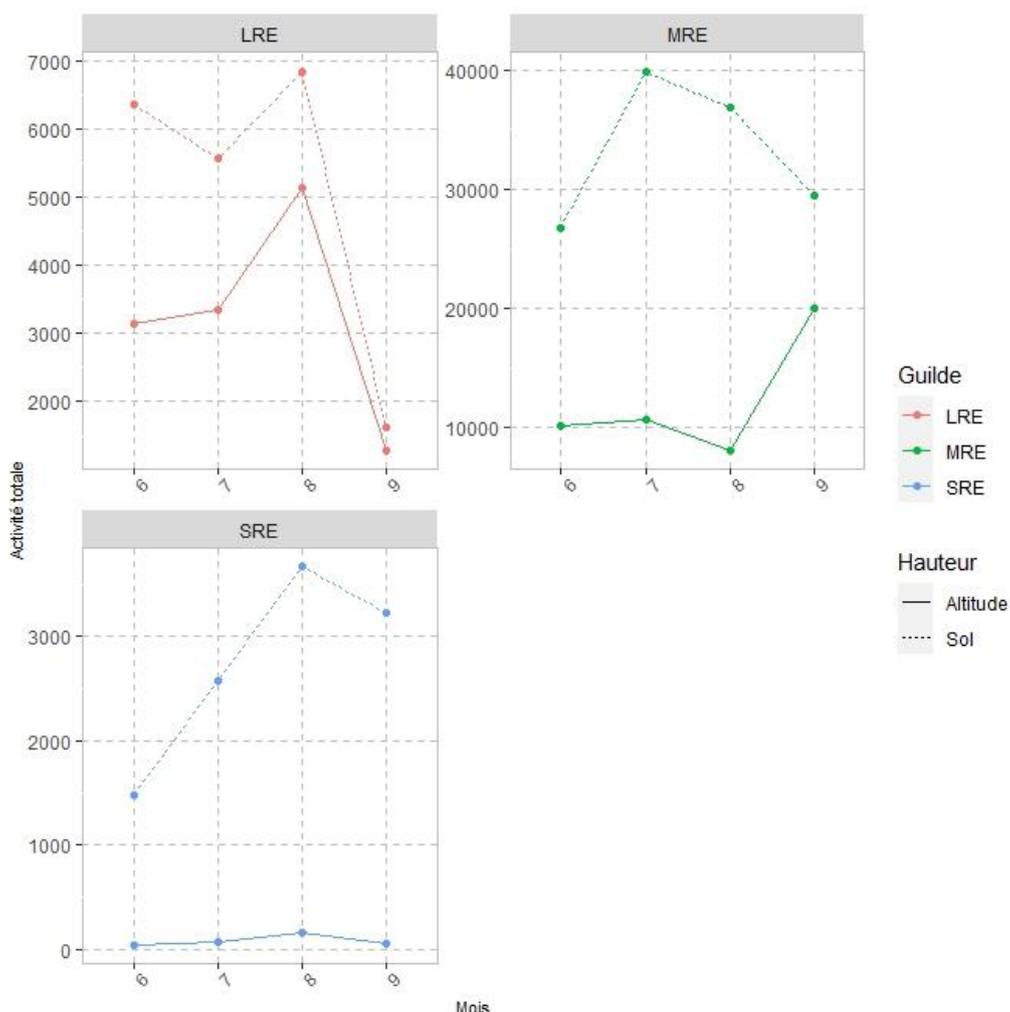
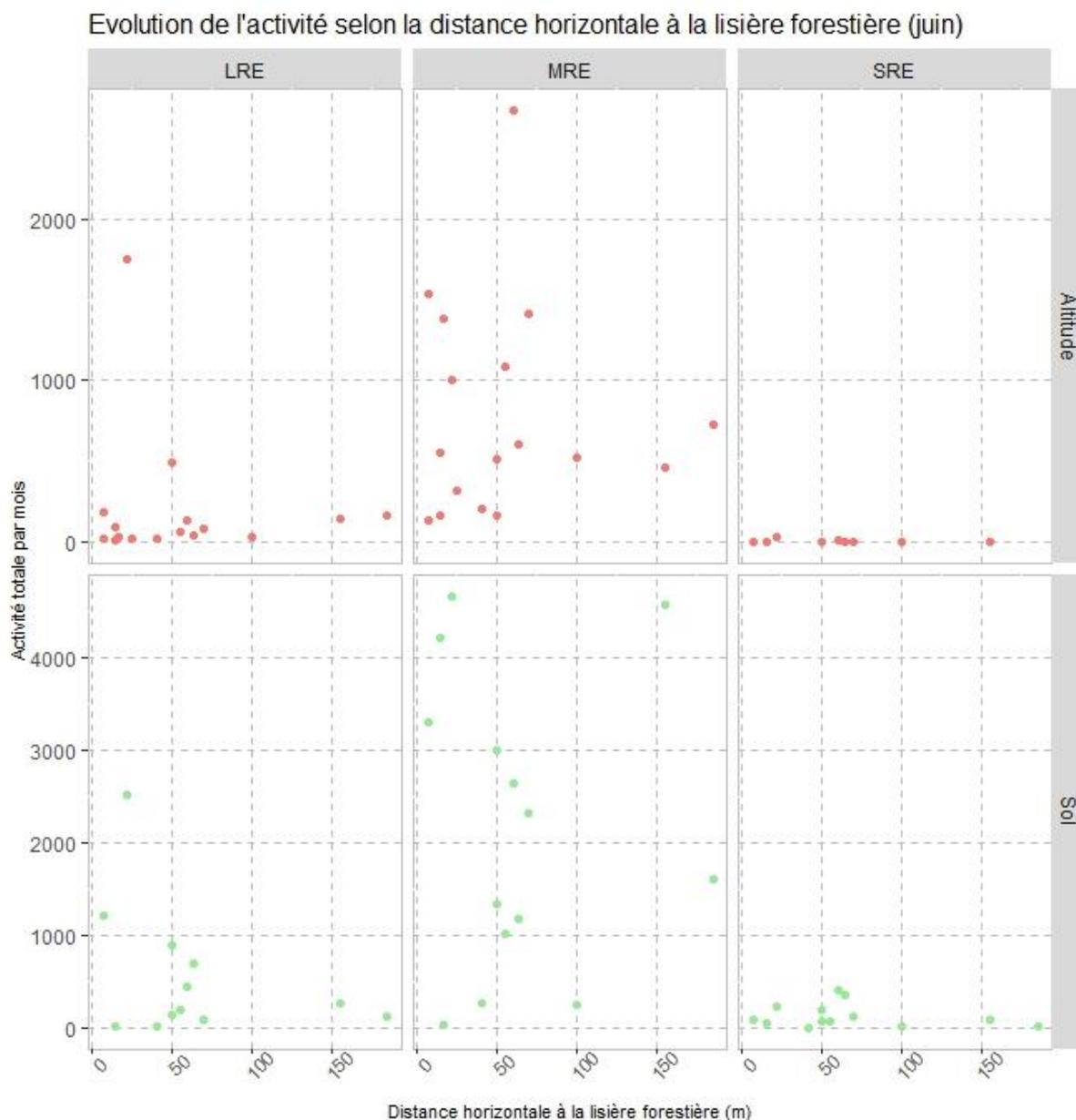


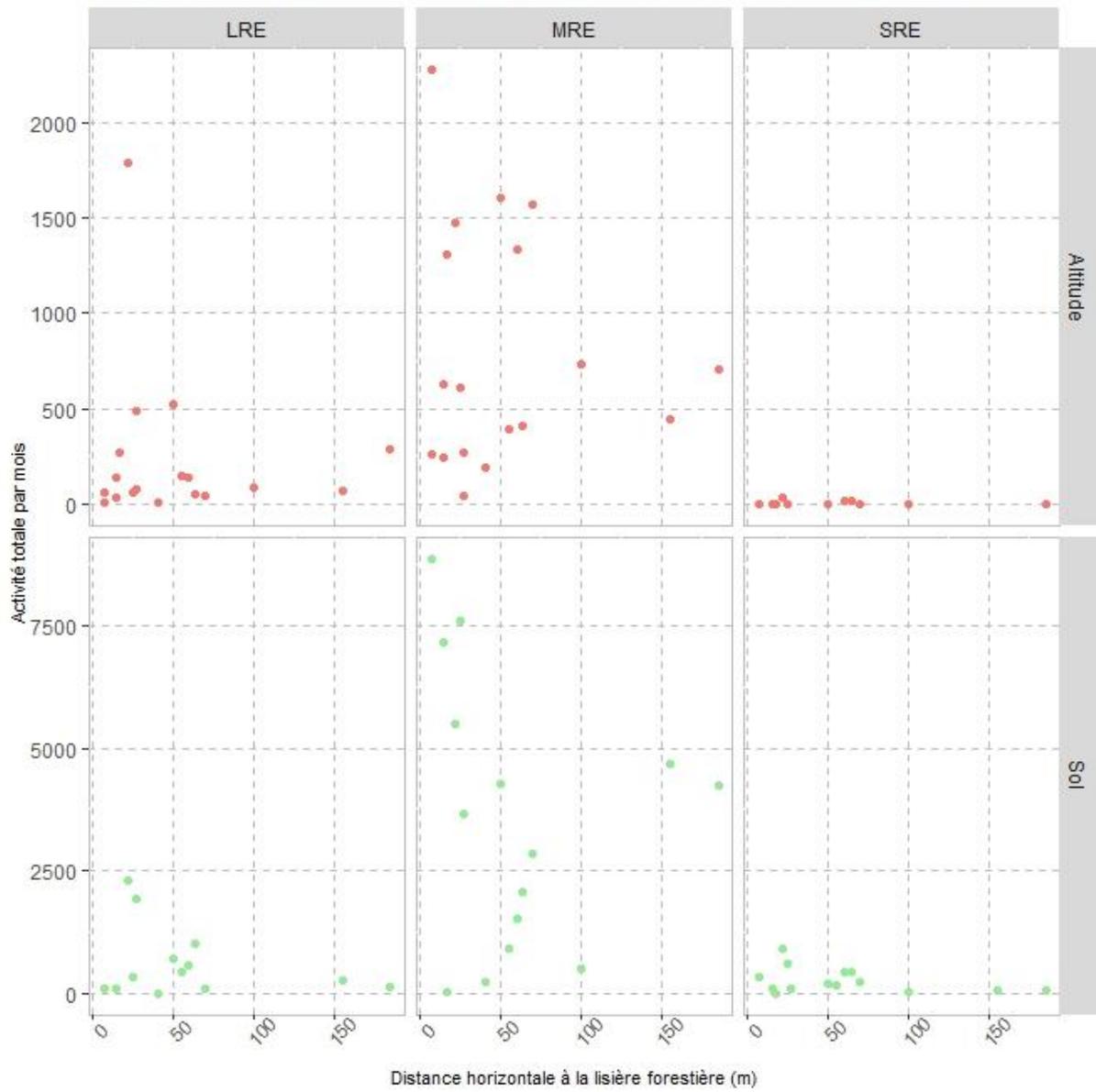
Figure 1 : Activité chiroptérologique mensuelle (nombre total de contacts par mois) par guildes et par hauteur de micro cumulée sur les 13 sites d'enregistrement.

1.1.2 Activité chiroptérologique en fonction de la distance horizontale à la lisière forestière

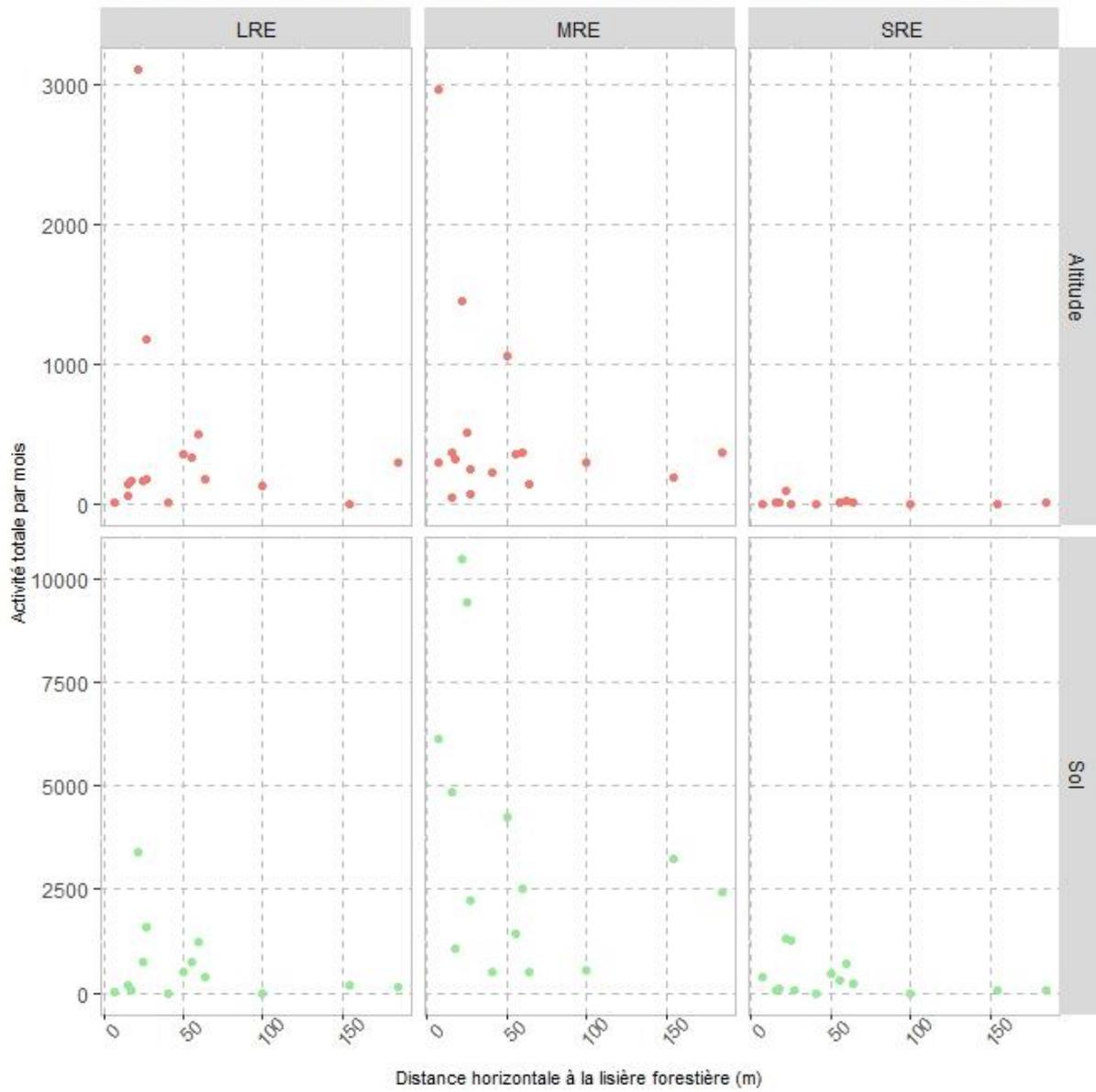
Les graphiques suivants illustrent l'activité chiroptérologique au sol par mois en fonction de la distance horizontale à la lisière forestière (Dh). A la lecture de ces graphiques, aucun effet clair de la distance horizontale à la lisière forestière ne semble exister au sein de notre jeu de données.



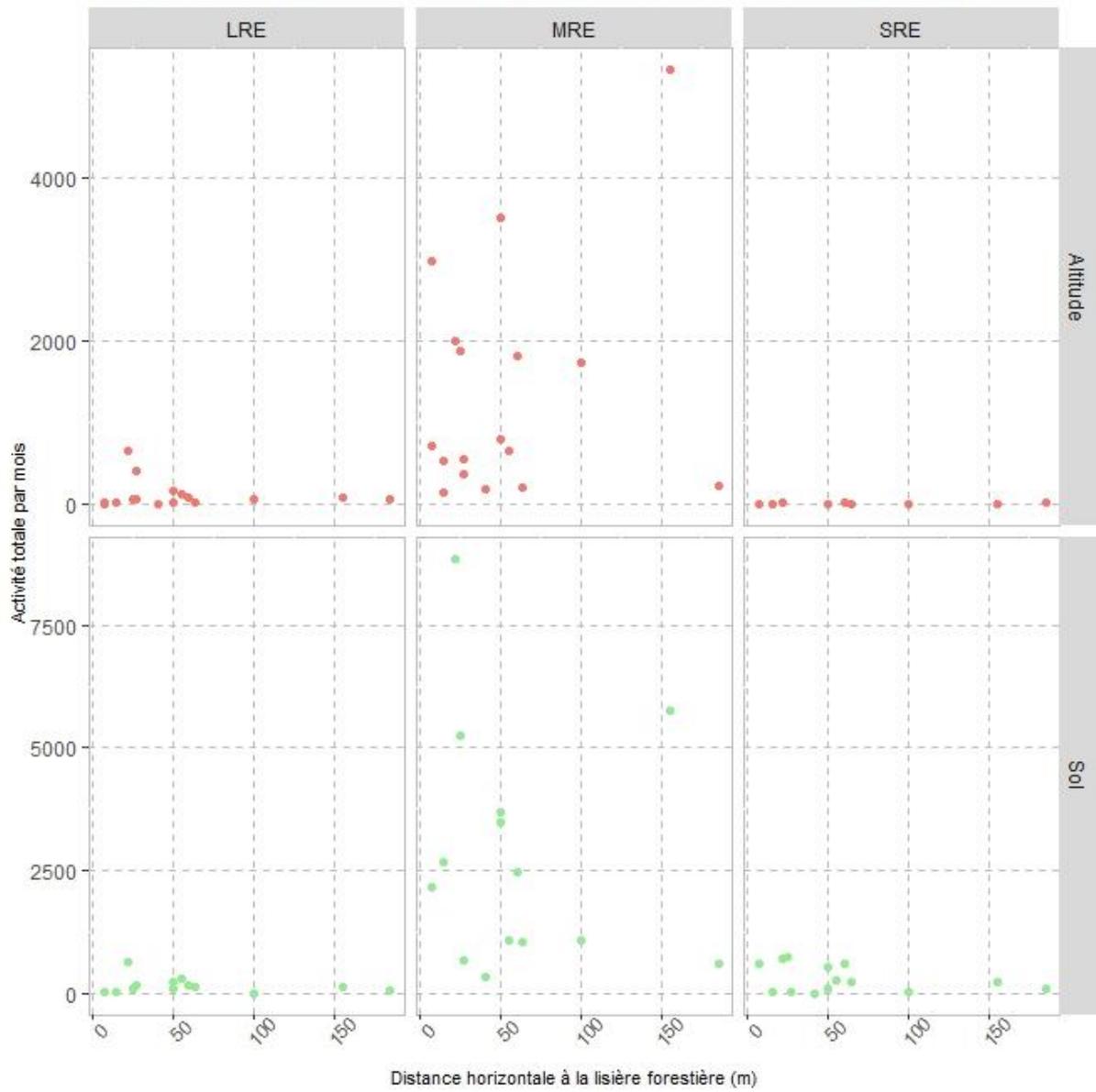
Evolution de l'activité selon la distance horizontale à la lisière forestière (juillet)



Evolution de l'activité selon la distance horizontale à la lisière forestière (août)



Evolution de l'activité selon la distance horizontale à la lisière forestière (septembre)



Evolution de l'activité selon la distance horizontale à la lisière forestière (été)

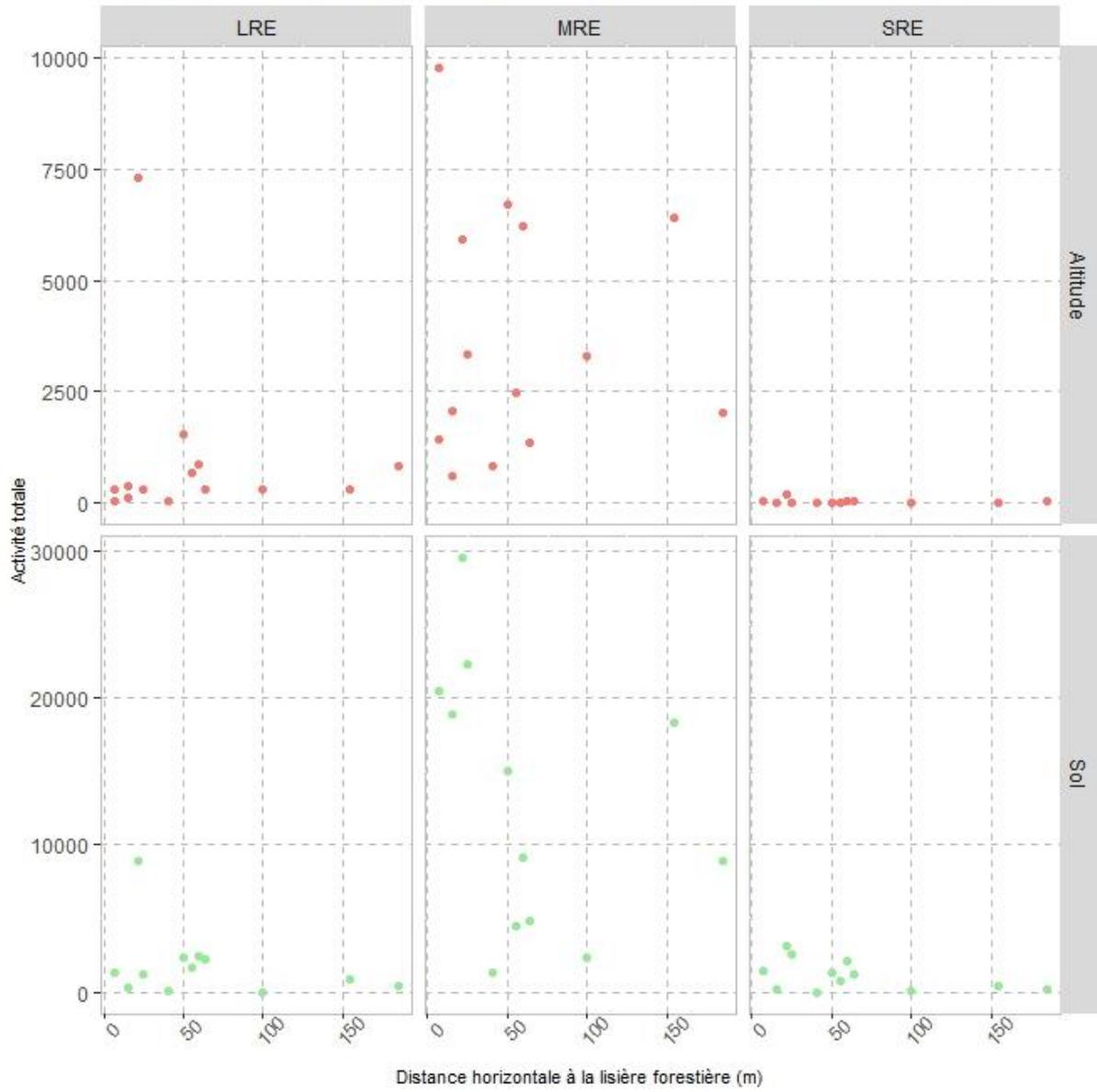
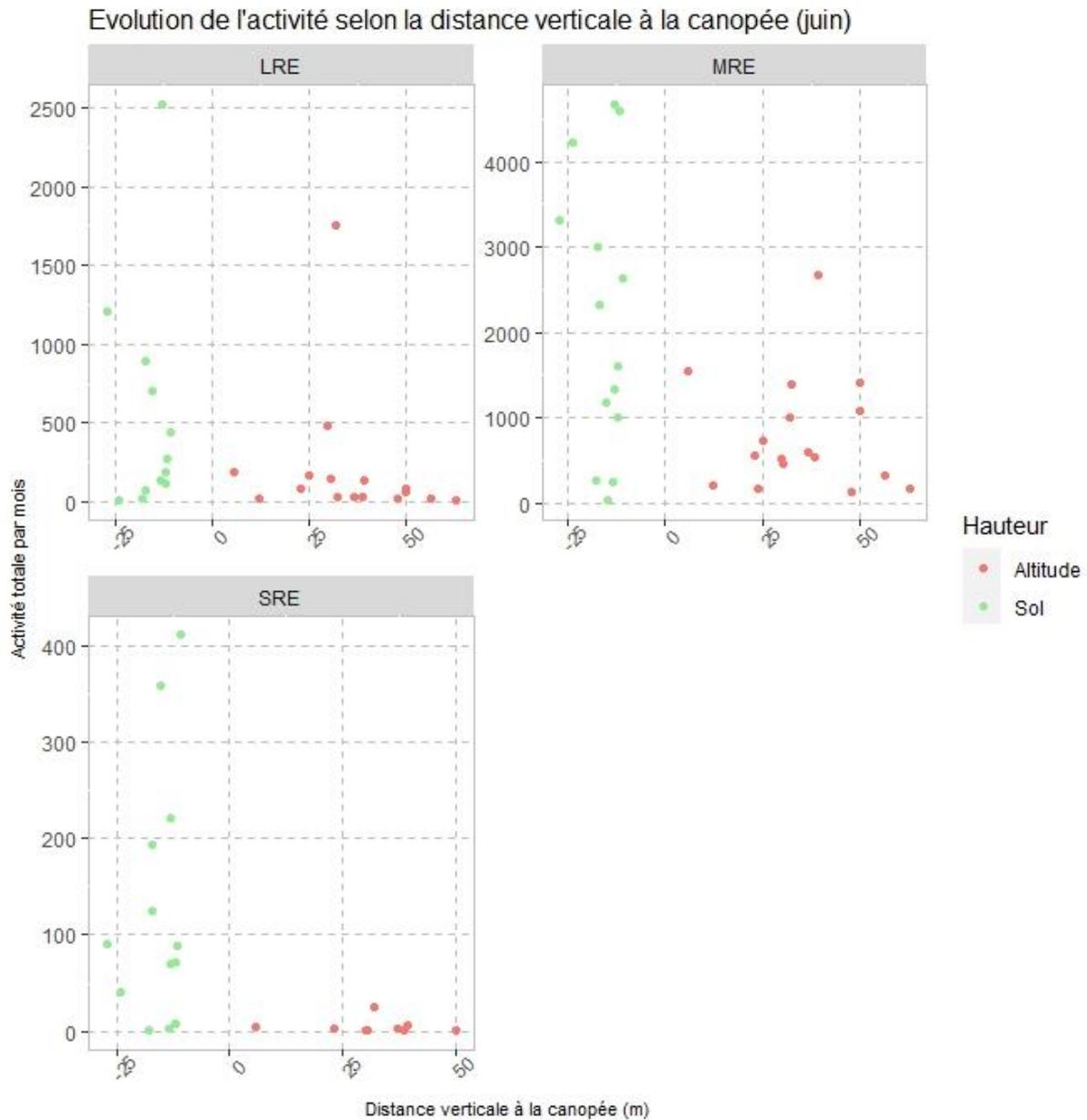


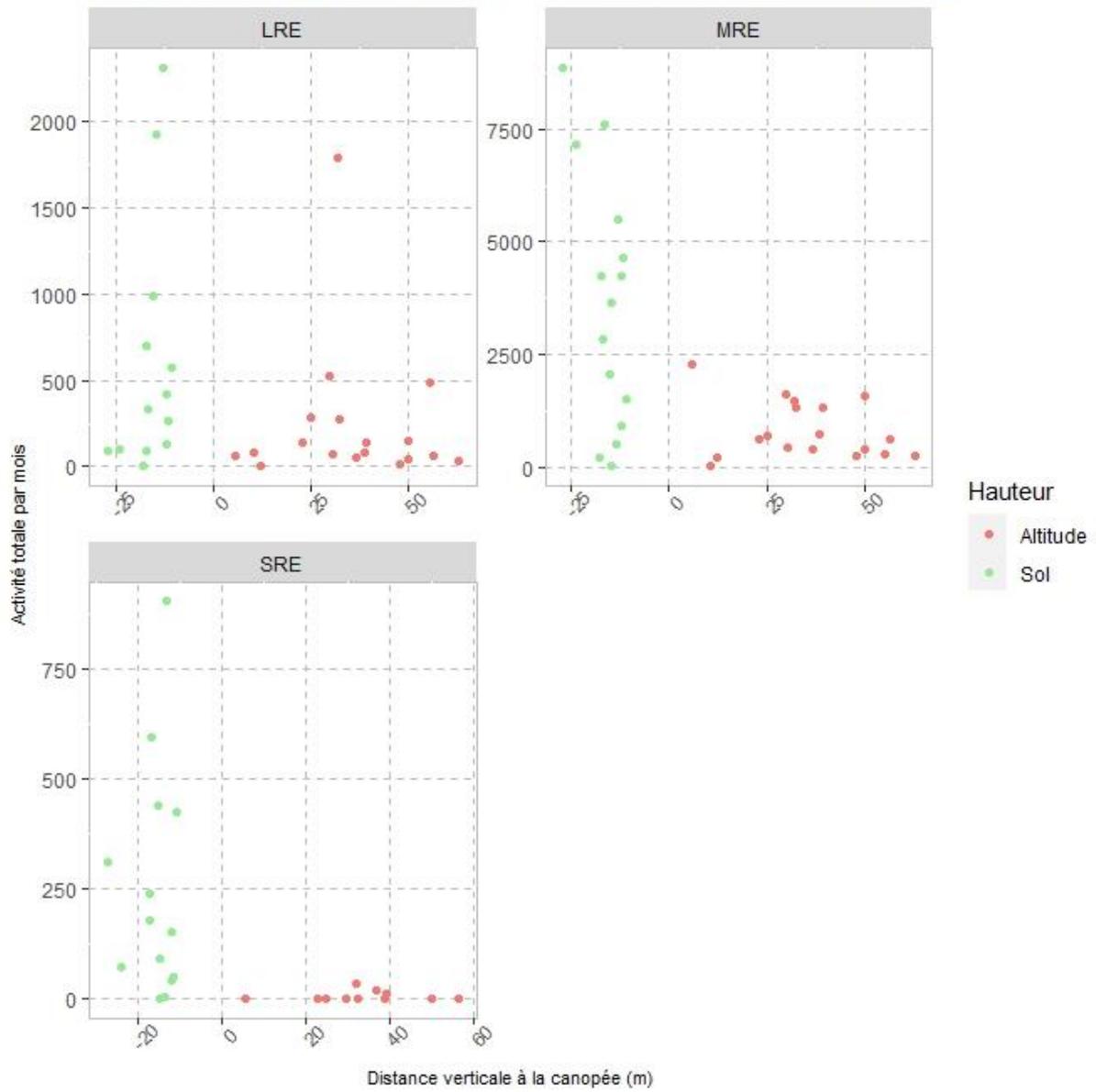
Figure 2 : Evolution de l'activité chiroptérologique en fonction de la distance horizontale à la lisière forestière, par mois et pour l'été. L'activité totale est nombre total de contacts enregistrés sur chacun des 13 sites sélectionnés.

1.1.3 Activité chiroptérologique en fonction de la distance verticale à la canopée

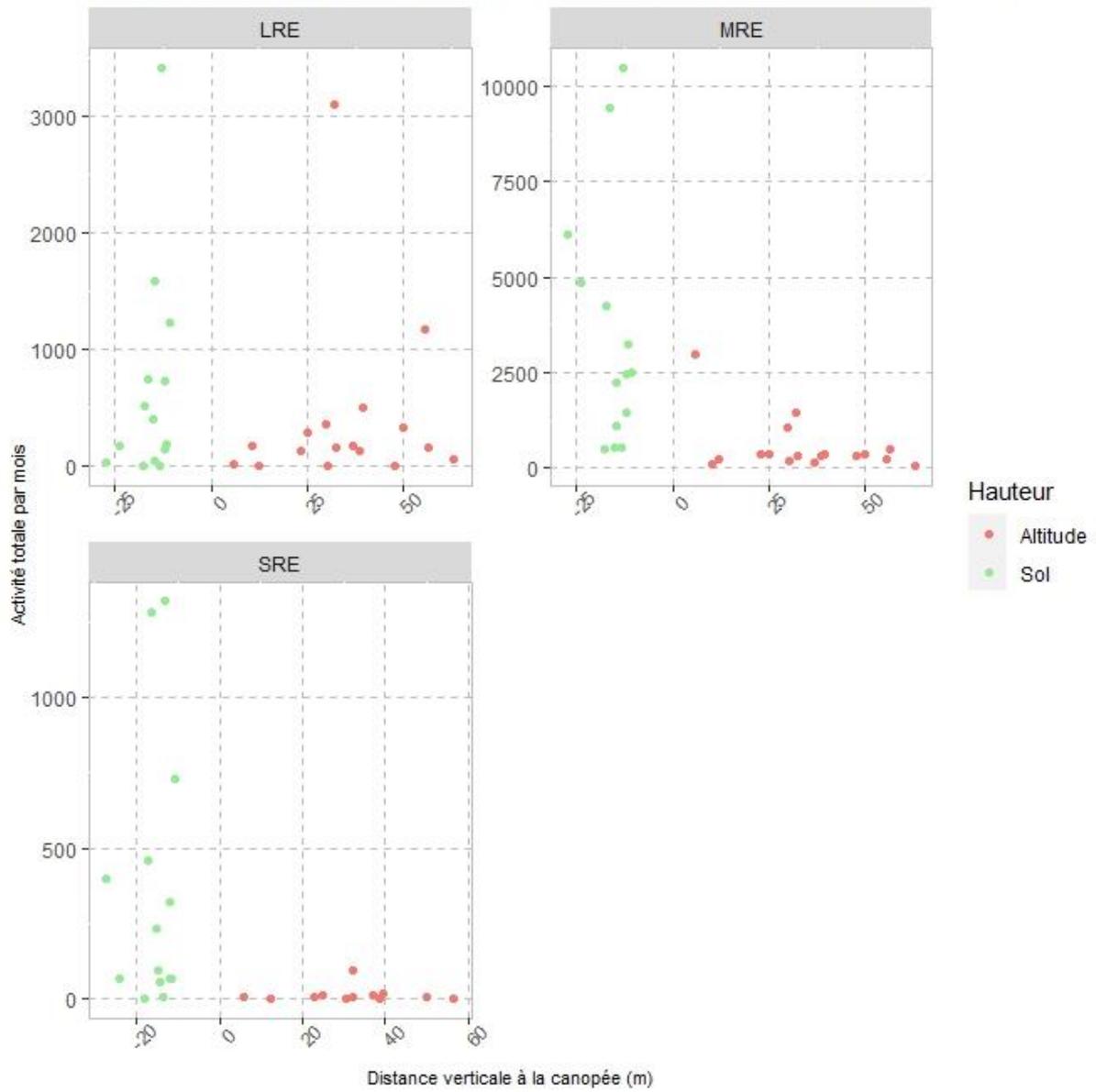
Les graphiques suivants font état de l'évolution de l'activité chiroptérologique en altitude par mois en fonction de la distance verticale à la canopée (Hc). A la lecture de ces graphiques, on peut distinguer que le groupe des LRE ne semblent pas réagir à la distance verticale par rapport à la canopée. Le groupe des MRE et le groupe des SRE semblent plus actifs au niveau du sol (-25 à 0 m) qu'au-dessus de la canopée (0 à 50 m).



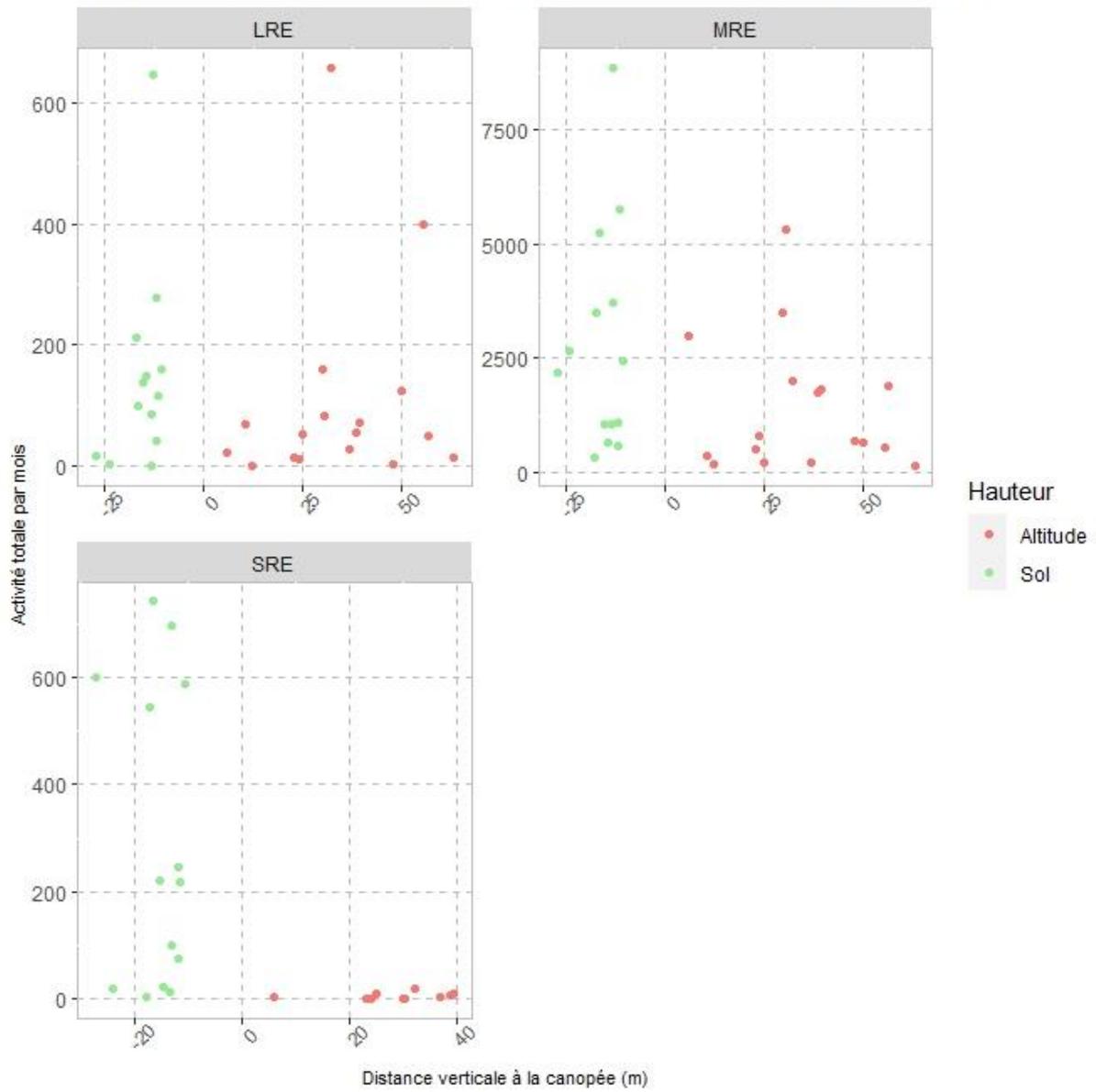
Evolution de l'activité en altitude selon la distance verticale à la canopée (juillet)



Evolution de l'activité en altitude selon la distance verticale à la canopée (août)



Evolution de l'activité en altitude selon la distance verticale à la canopée (septembre)



Evolution de l'activité en altitude selon la distance verticale à la canopée (été)

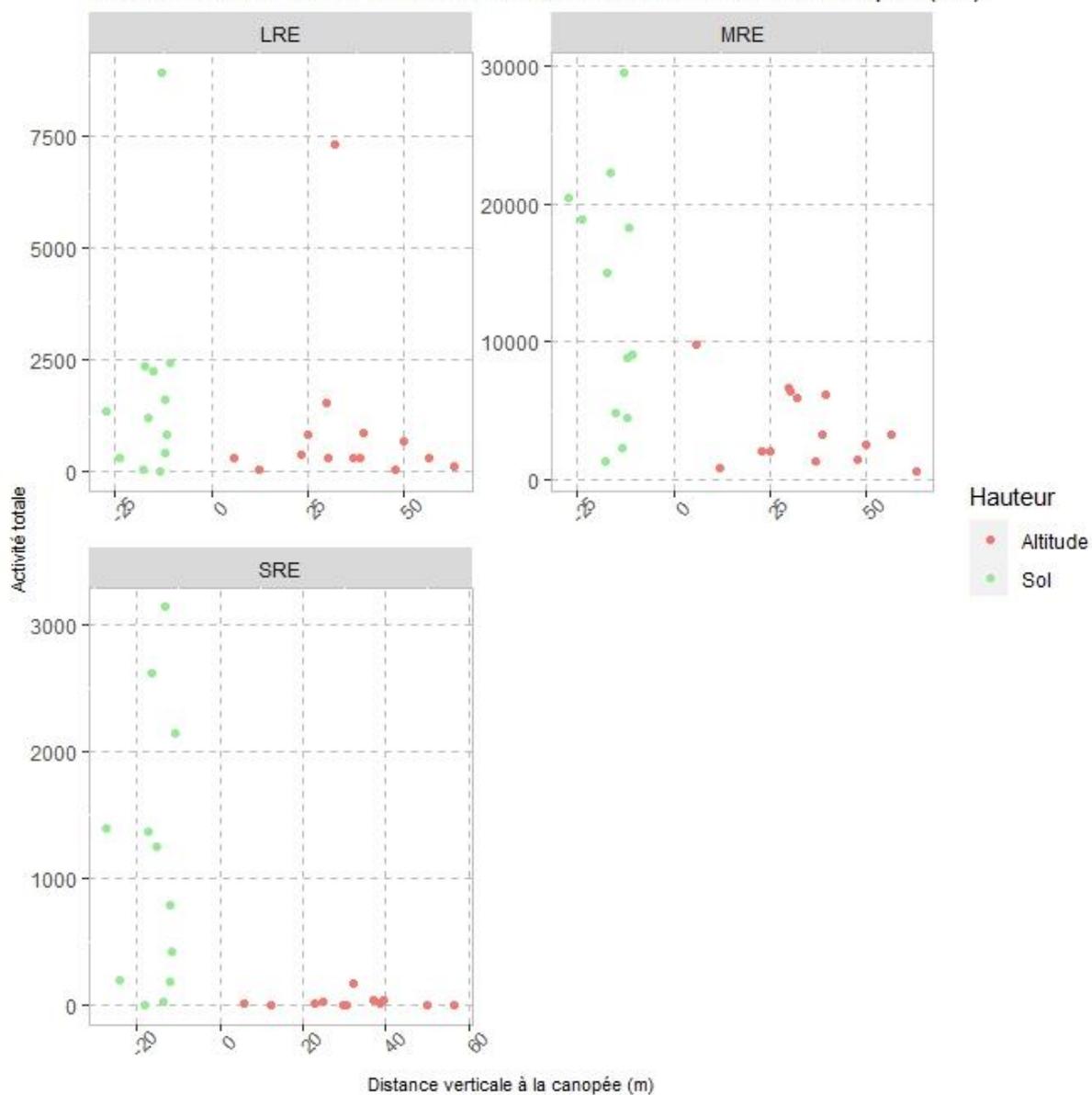
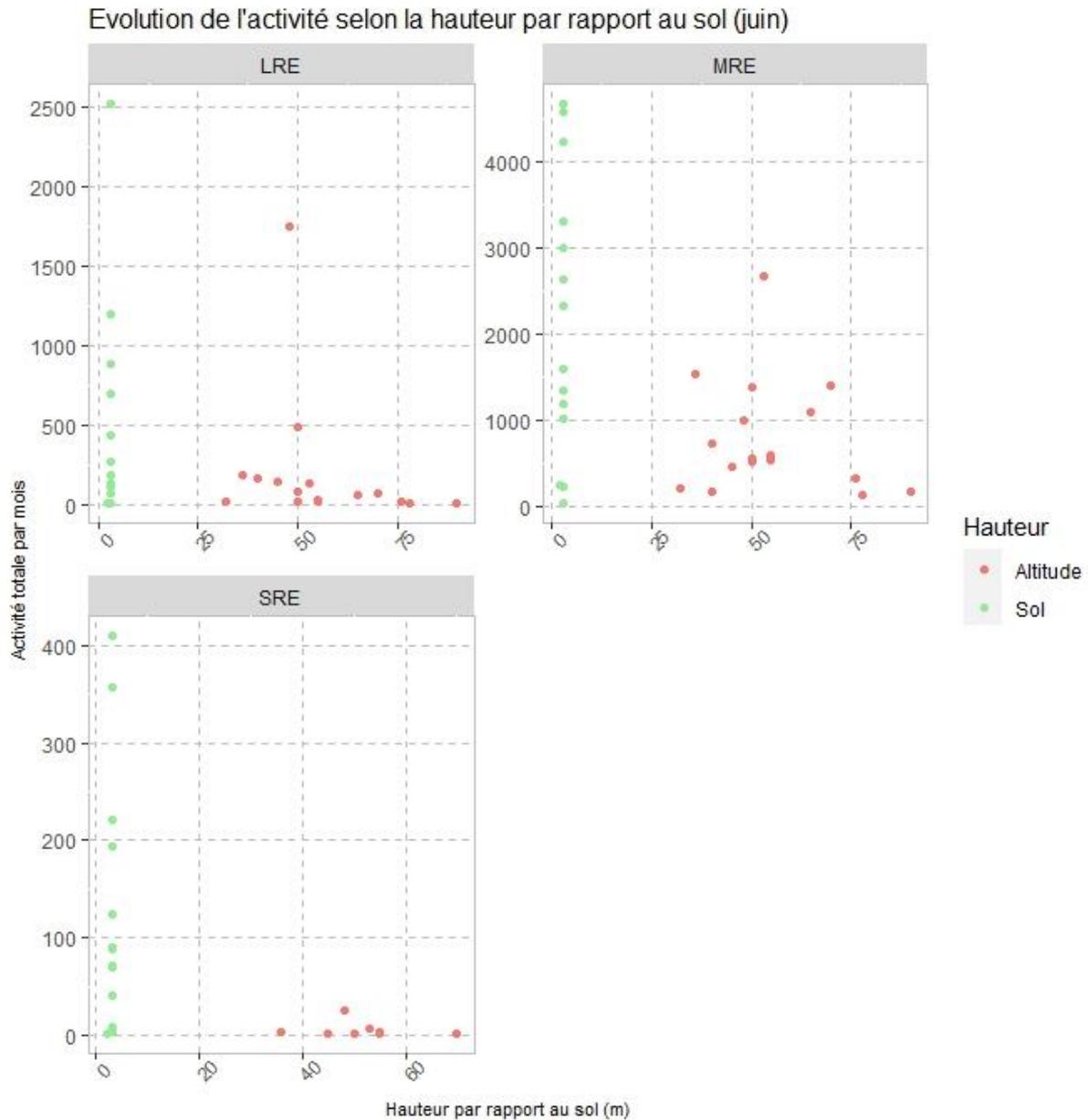


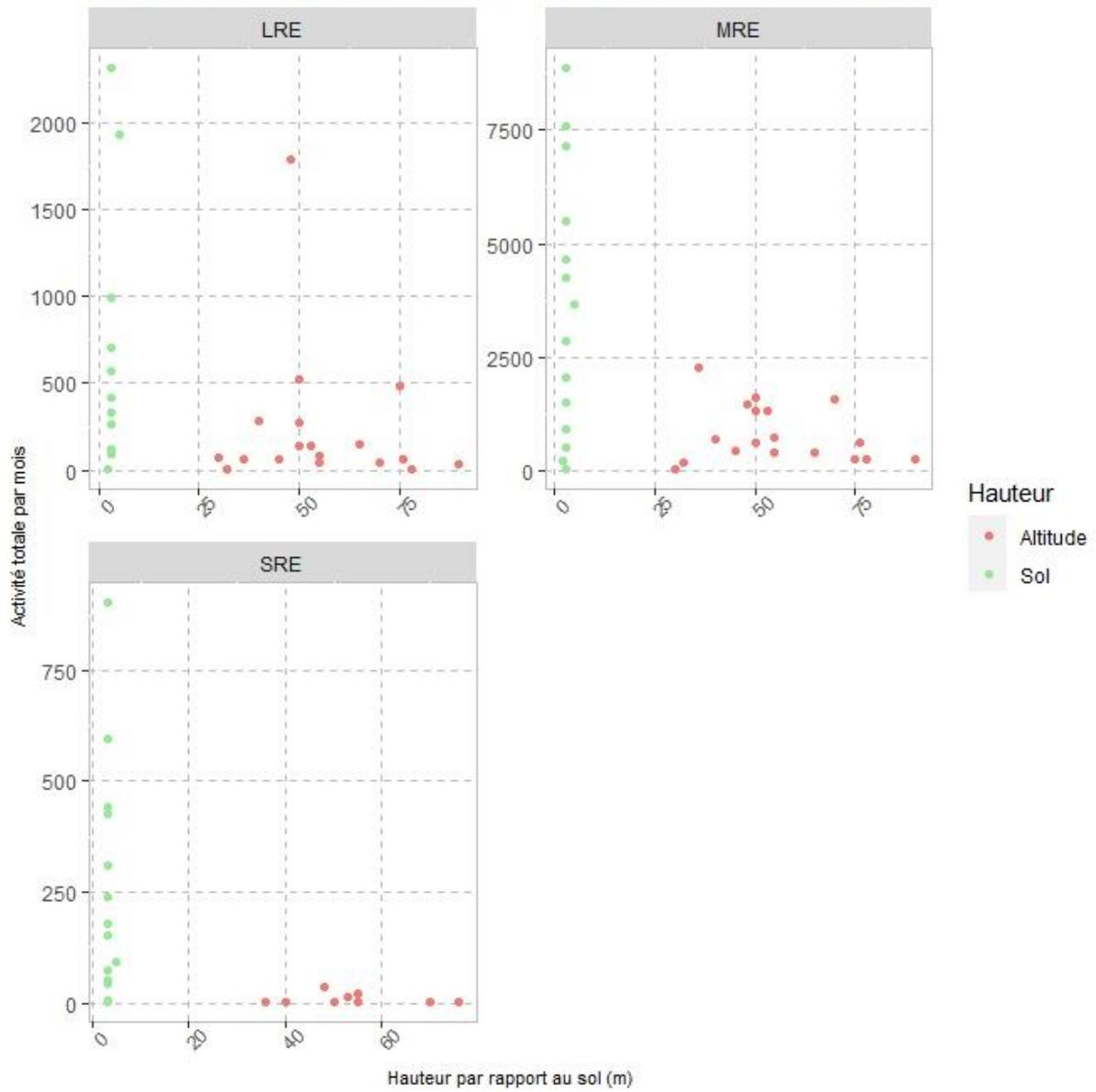
Figure 3 : Evolution de l'activité chiroptérologique en fonction de la distance verticale à la canopée, par mois et pour l'été.

1.1.4 Activité chiroptérologique en fonction de la hauteur par rapport au sol

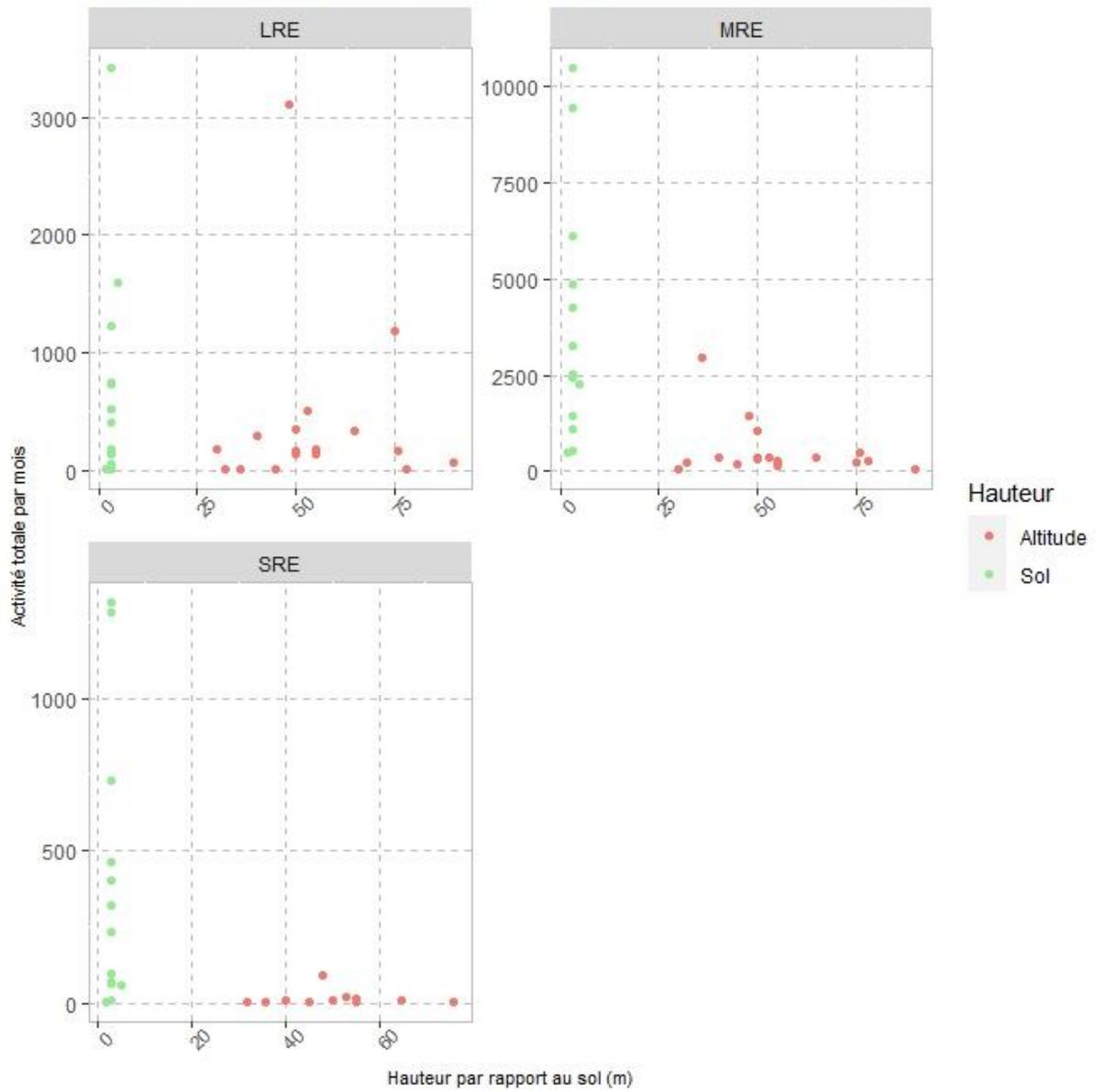
Les graphiques suivants font état de l'évolution de l'activité selon la hauteur par rapport au sol (Hs), sur base des micros au sol et en altitude. Il apparaît clairement qu'un manque de micros entre 5 et 30 m limite l'interprétation du comportement des chauves-souris entre ces hauteurs.



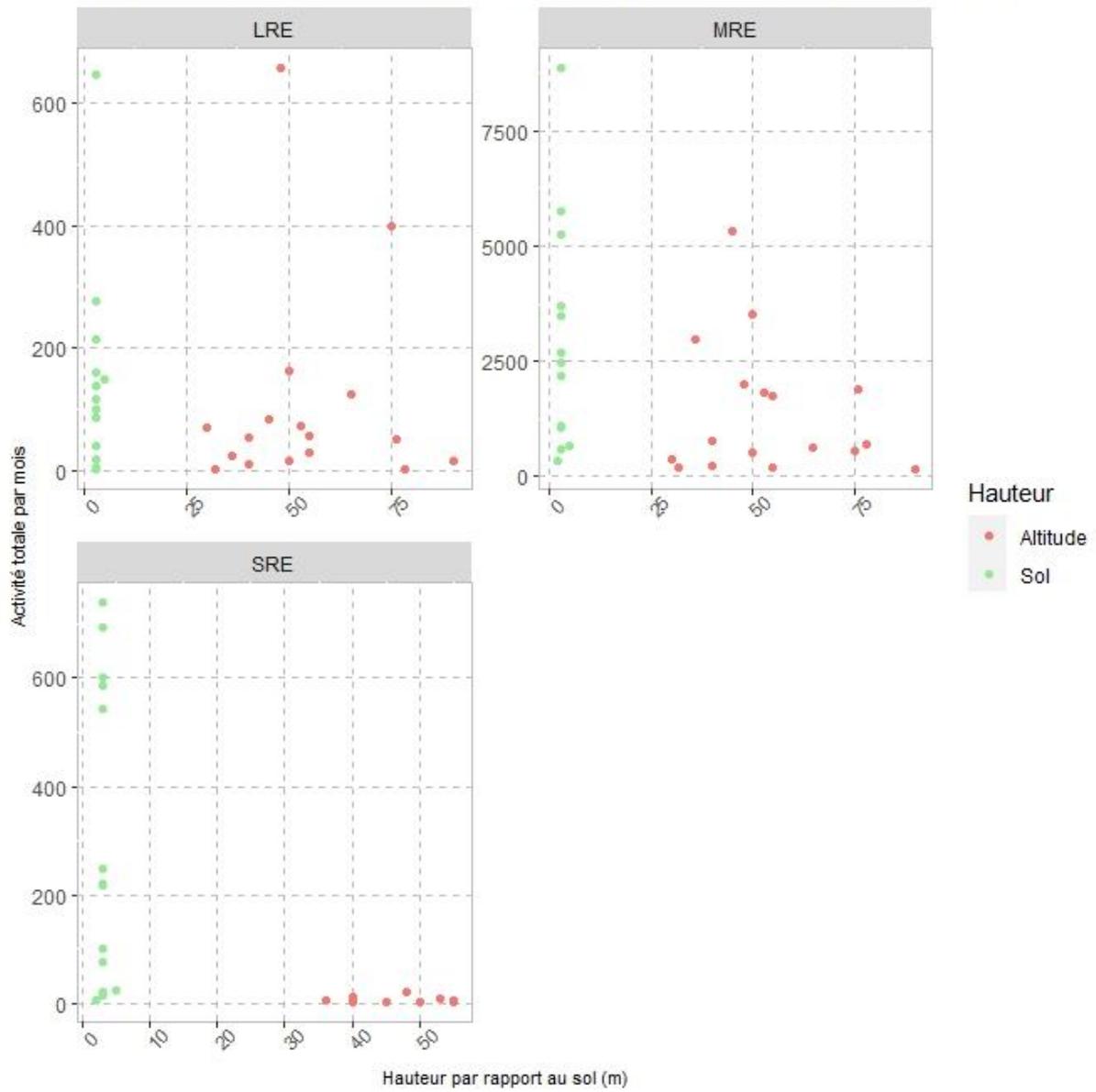
Evolution de l'activité en altitude selon la hauteur par rapport au sol (juillet)



Evolution de l'activité en altitude selon la hauteur par rapport au sol (août)



Evolution de l'activité en altitude selon la hauteur par rapport au sol (septembre)



Evolution de l'activité en altitude selon la hauteur par rapport au sol (été)

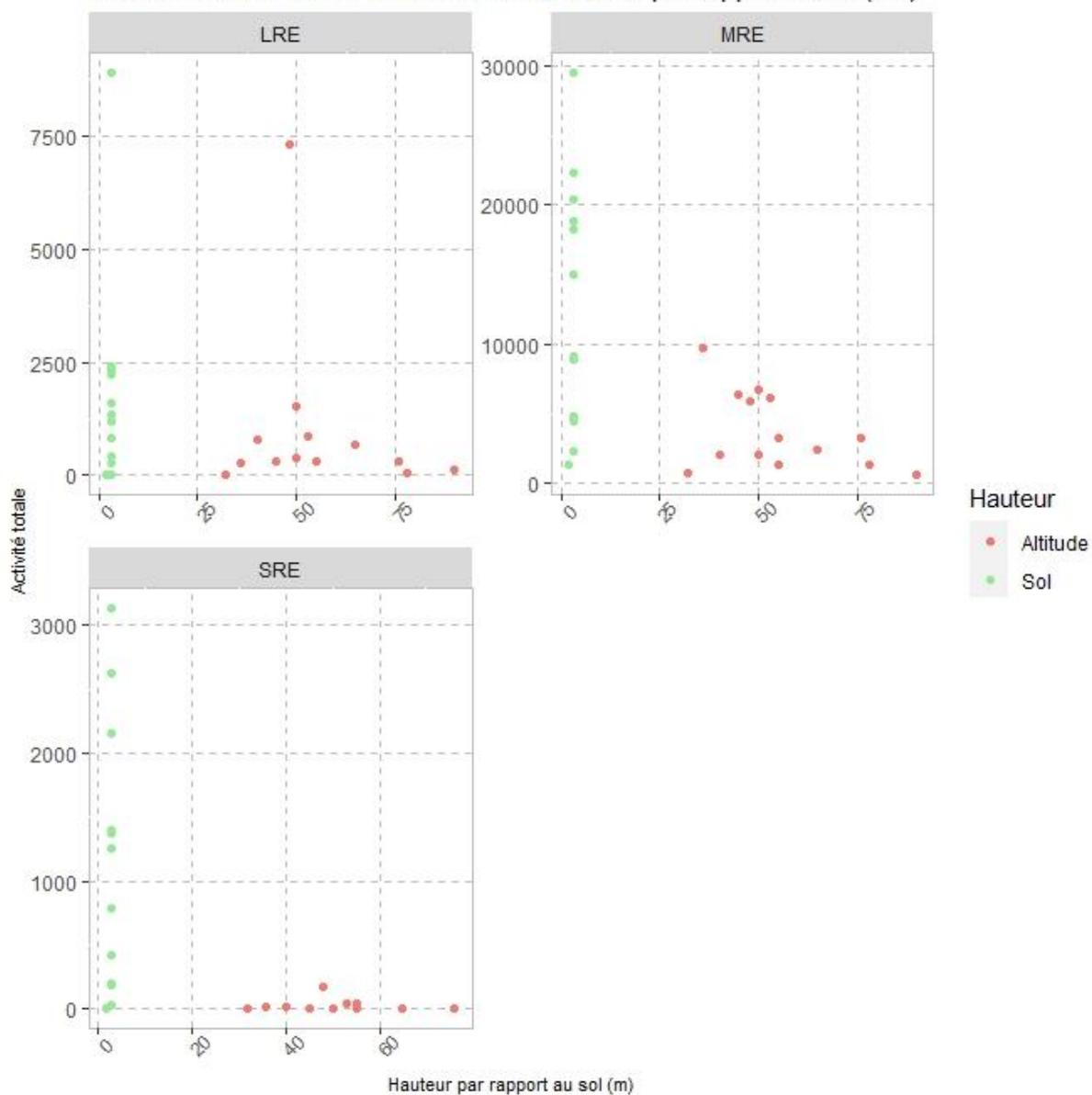
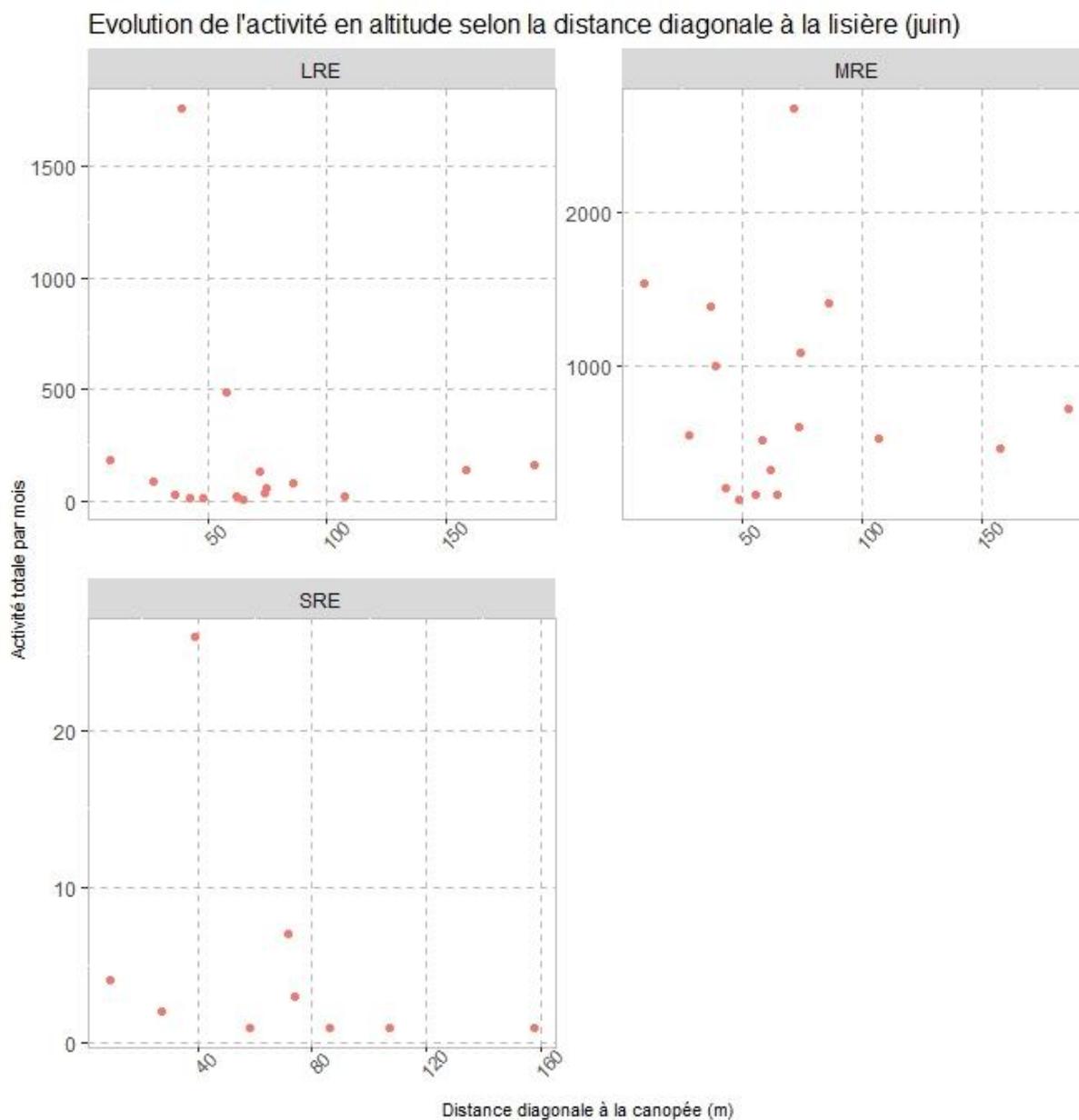


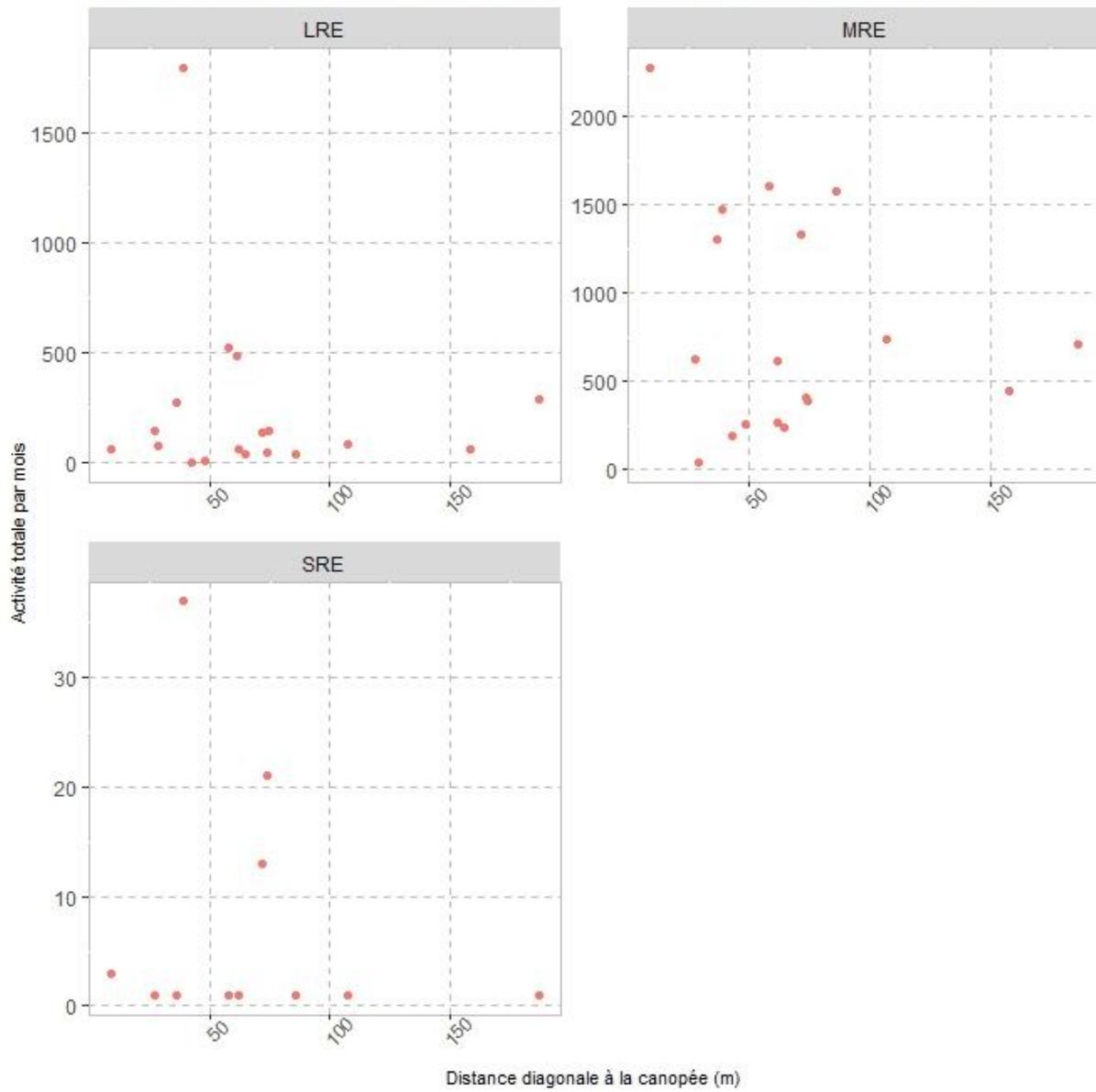
Figure 4: Evolution de l'activité chiroptérologique en fonction de la hauteur par rapport au sol, par mois et pour l'été.

1.1.5 Activité chiroptérologique en altitude en fonction de la distance diagonale à la lisière forestière

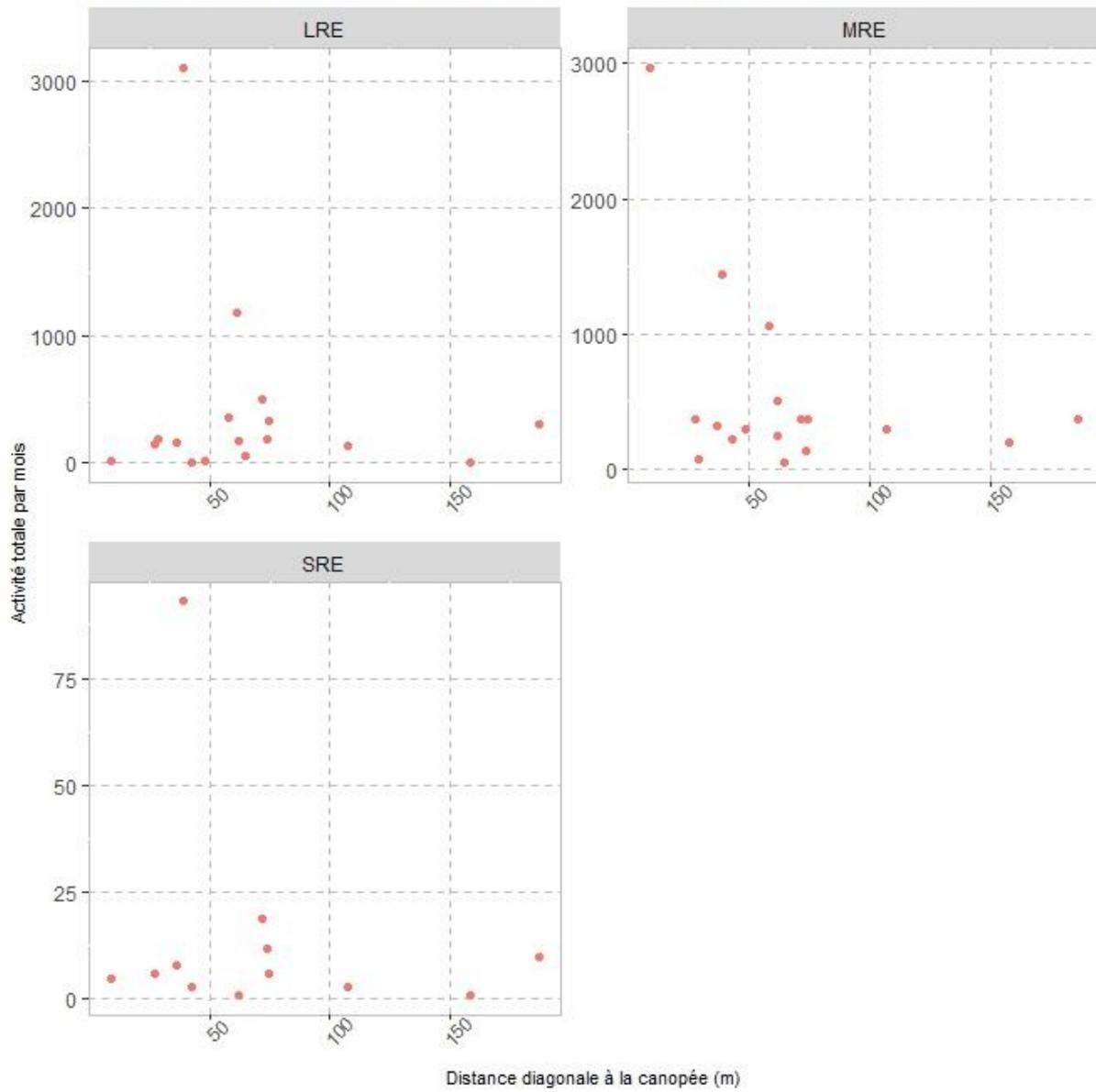
Les graphiques suivants décrivent l'évolution de l'activité chiroptérologique en altitude selon la distance diagonale à la lisière (Dd). A nouveau, aucun effet évident ne semble se dégager à la lecture de ces graphiques. La distance diagonale correspondant à l'hypothénuse d'un triangle rectangle entre la distance verticale et horizontale d'un micro à la lisière forestière, elle est donc fortement corrélée à ces deux distances.



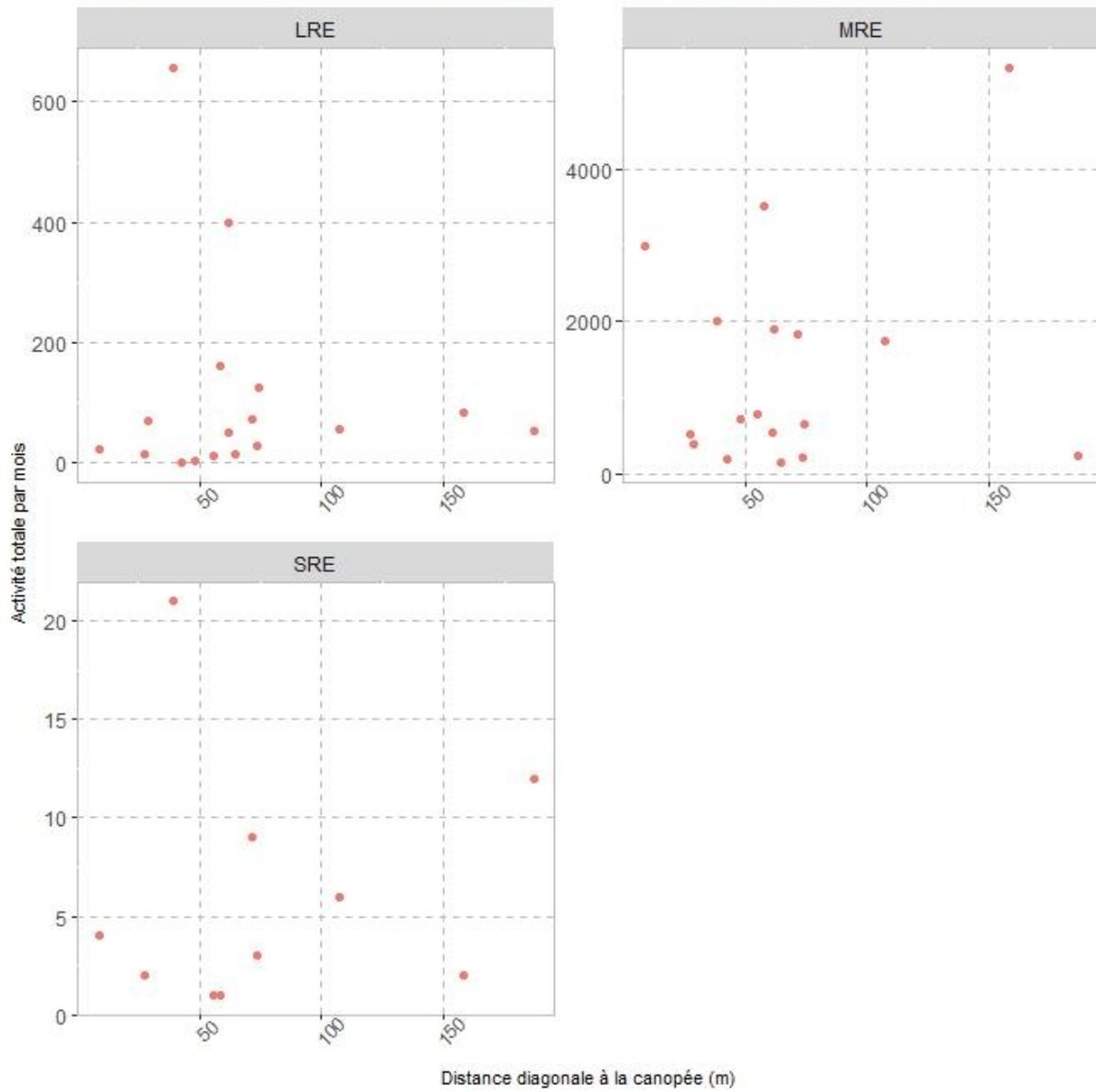
Evolution de l'activité en altitude selon la distance diagonale à la lisière (juillet)



Evolution de l'activité en altitude selon la distance diagonale à la lisière (août)



Evolution de l'activité en altitude selon la distance diagonale à la lisière (septembre)



Evolution de l'activité en altitude selon la distance diagonale à la lisière (été)

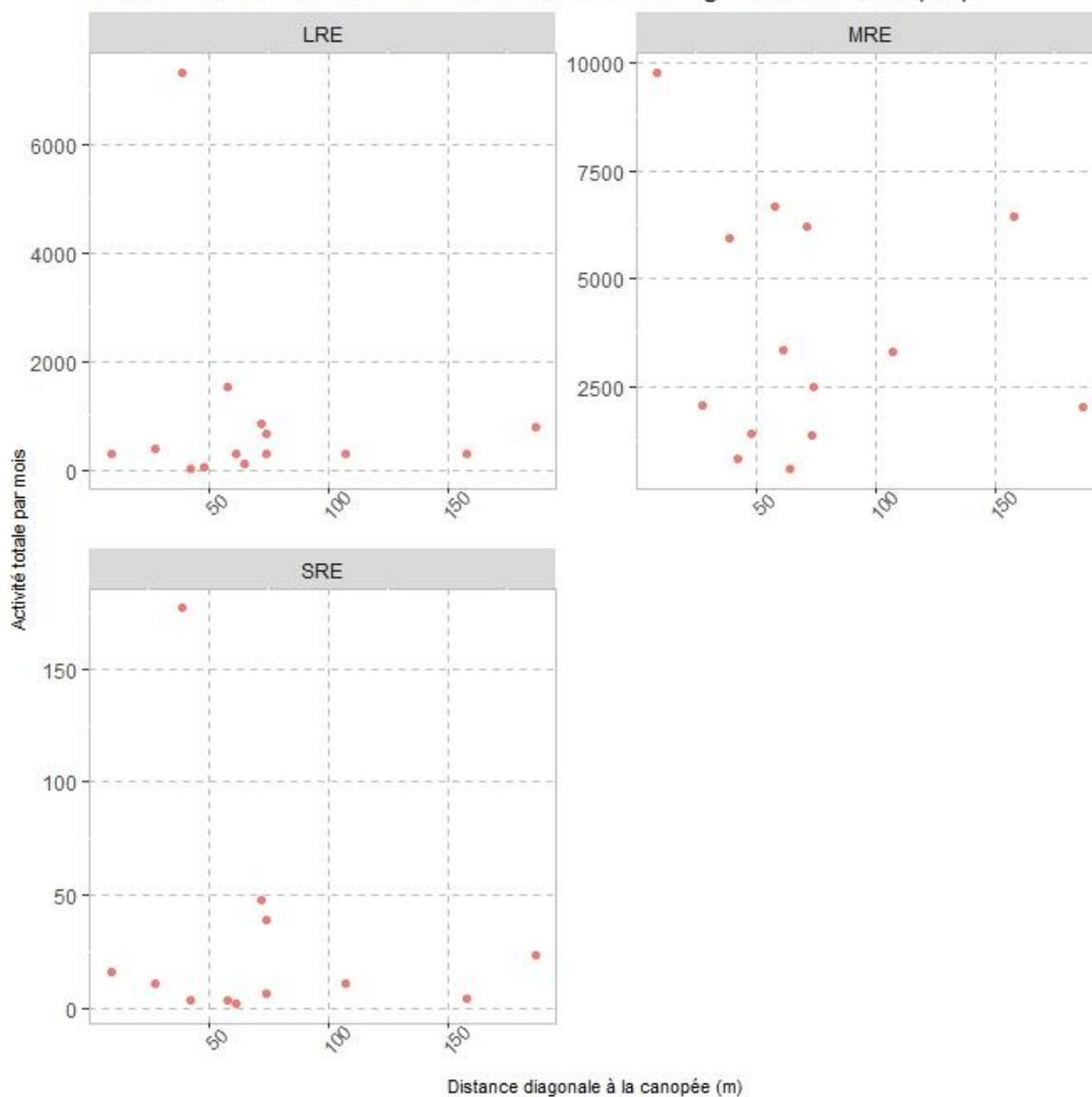


Figure 5 : Evolution de l'activité chiroptérologique en altitude en fonction de la distance diagonale à la canopée, par mois et pour l'été.