

**MISE À JOUR ET APPROFONDISSEMENT DE L'ANALYSE DE
L'ACTIVITÉ DES CHIROPTÈRES EN HAUTEUR EN FONCTION DES
CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES, DE SA RÉPARTITION AU COURS
DE LA NUIT ET DES MILIEUX ENVIRONNANT**

Rédacteur(s) : Marie Labouré

Analyste (s) : Marie Labouré

Comité de lecture :

Pierre PAPON, Docteur en Géographie, Directeur du pôle écologie

Sylvain LE ROUX, Docteur en Géographie, Directeur développement et innovation

Date : 19/04/2024



Sommaire

RÉSUMÉ	3
3	
INTRODUCTION	4
1. MATÉRIELS ET MÉTHODES	6
1.1. COLLECTE ET ANALYSE DES SONS	6
1.2. ATTRIBUTION DES DONNEES METEOROLOGIQUES ET HORAIRES	6
1.3. ANALYSES MENEES SUR LE JEU DE DONNEES	6
1.4. LIMITES DE L'ETUDE	7
2. RÉSULTATS	8
2.1. REPARTITION DES ESPECES EN FONCTIONS DE DIFFERENTES PERIODES	8
2.1.1. <i>Analyse de la diversité spécifique sur le cycle complet</i>	8
2.1.2. <i>Analyse de l'activité des chiroptères par phase du cycle biologique</i>	9
2.1.3. <i>Analyse de la diversité spécifique et de l'activité des chiroptères par mensualité sur le cycle complet</i>	10
2.1.4. <i>Analyse de l'activité journalière des chiroptères sur le cycle complet</i>	11
2.2. MISE EN PARALLELE DES DONNEES METEOROLOGIQUES ET DE L'ACTIVITE CHIROPTEROLOGIQUE	12
2.2.1. <i>Analyse de la vitesse de vent en fonction de l'activité chiroptérologique</i>	12
2.2.2. <i>Analyse de la température en fonction de l'activité chiroptérologique</i>	13
2.3. REPARTITION DE L'ACTIVITE EN FONCTION DU CYCLE CIRCADIEN	14
2.4. ANALYSE MULTIVARIEE DE L'INFLUENCE DES VARIABLES TEMPORELLES ET METEOROLOGIQUES SUR L'ACTIVITE DES CHIROPTERES	15
2.4.1. <i>Analyse par espèces</i>	16
2.5. REPARTITION DES CONTACTS DE CHIROPTERES EN FONCTION DES DISTANCES ET DES SURFACES D'HABITATS	20
2.5.1. <i>Répartition des contacts en fonction de la proximité d'habitats favorables</i>	20
2.5.2. <i>Répartition des contacts en fonction des proportions d'habitats naturels environnants</i>	21
2.6. ANALYSE MULTIVARIEE DE L'INFLUENCE DES VARIABLES LIEES AUX HABITATS NATURELS ENVIRONNANTS SUR L'ACTIVITE DES CHIROPTERES	25
2.6.1. <i>Analyse de l'effet de la proximité d'habitats favorables</i>	26
2.6.2. <i>Analyse de l'effet de la proportion d'habitats naturels environnants</i>	29
3. CONCLUSION ET DISCUSSION	34
3.1. ANALYSE DE L'INFLUENCE DES VARIABLES PERIODIQUES ET TEMPORELLES SUR L'ACTIVITE DES CHIROPTERES	34
3.2. ANALYSE DE L'INFLUENCE DES VARIABLES LIEES AUX HABITATS NATURELS ENVIRONNANTS	38
3.3. PERSPECTIVE DE L'ETUDE	40
BIBLIOGRAPHIE	41



RÉSUMÉ

Afin de mettre à jour et approfondir l'article d'ENCIS Environnement, quatre années d'enregistrements chiroptérologiques ont été ajoutées au jeu de données d'origine. Ainsi, neuf années d'études sur mâts de mesures météorologiques à différentes hauteurs réparties sur 60 sites représentatifs du grand centre ouest de la France, ont permis d'acquérir des jeux de données conséquents. Ces derniers permettent l'étude de la répartition des chiroptères en fonction des conditions météorologiques et de sa répartition au cours de la nuit. Les thématiques de températures et de vitesses de vent sont étudiées ainsi que la diversité spécifique en hauteur et la répartition de l'activité chiroptérologique en fonction du cycle circadien. Parallèlement, les corrélations entre la nature de l'écosystème environnant (milieu ouvert, forêt, etc.) et l'activité des chauves-souris ont été étudiées de façon détaillée. Afin de cibler la prise en compte des risques de mortalité des chiroptères liés à l'éolien, cet article analyse les enregistrements réalisés au-dessus de 70 m.

MOTS CLÉS : chiroptères, température, vitesse de vent, altitude, cycle circadien, acoustique, habitats naturels environnants



INTRODUCTION

Différentes variables influencent l'activité chiroptérologique : la saisonnalité, les habitats, les conditions météorologiques, l'altitude, l'heure de la nuit conditionnent la présence de chauves-souris :

- **La saisonnalité** : les chiroptères affichent un cycle biologique présentant une phase d'hibernation de novembre à février, une phase de migration printanière vers les gîtes estivaux de mars à mai, une phase de mise-bas au sein de ces gîtes de juin à juillet-août, une période de migration vers les secteurs de swarming (accouplements) et vers les gîtes hivernaux d'août à octobre. La majorité des auteurs s'accordent sur le fait que la saisonnalité joue un rôle prépondérant sur l'activité chiroptérologique plus élevée en fin d'été-début d'automne, ce qui correspond à une période de migration des chauves-souris (Alcalde 2003, Arnett *et al.* 2008, Rydell *et al.* 2010a, Brinkmann *et al.* 2011, Amorim *et al.* 2012, Voigt *et al.* 2012, Limpens *et al.* 2013).

- **Les habitats** : en effet, les habitats présents au niveau des secteurs étudiés influencent l'activité chez les chiroptères (Brinkmann *et al.* 2011, Hensen 2004, Grindal & Brigham 1998). L'activité serait plus accrue au niveau des côtes, des forêts, des milieux hétérogènes qu'au niveau des openfields. Ces résultats sont confirmés par plusieurs études (Ahlen *et al.* et . 2003, Eurobats 2016, Rydell *et al.* 2010, Mathews *et al.* 2012 Lacoeyllhe *et al.* 2018, Lacoeyllhe *et al.* 2016, Kelm *et al.* 2014, Boughey *et al.* 2011).

- **La température** : si plusieurs auteurs concluent à une corrélation positive entre augmentation de la température et activité (Redell *et al.* 2006 ; Arnett *et al.* 2006, 2007 ; Baerwald and Barclay 2011, Voigt *et al.* 2015), d'autres ne considèrent pas ce paramètre en tant que facteur influençant l'activité chiroptérologique (Horn *et al.* 2008 ; Kerns *et al.* 2005). Des études récentes ont cependant permis de mettre en évidence une augmentation marquée de l'activité chiroptérologique entre 10 et 25 °C (Labouré ENCIS Environnement 2021, Behr *et al.* 2017, Heim *et al.* 2016, Martin *et al.* 2015).

- **La vitesse de vent** : Rydell *et al.* (2010) ont noté des activités maximales pour une vitesse de vent entre 0 et 2 m/s puis, de 2 à 8 m/s, une activité diminuant pour devenir inexistante au-delà de 8 m/s. Behr *et al.* (2007) arrivèrent aux mêmes conclusions pour des vitesses de vent supérieures à 6,5 m/s. La validation de l'influence de cette variable semble aussi complexe. Certaines espèces, à l'exemple des noctules, robustes de par leur taille et leur vol puissant, apparaissent comme moins influencées que d'autres par des conditions telles que la vitesse de vent (Arthur et Lemaire 2015). Si la plupart des études sur le sujet concordent sur ce phénomène, les valeurs seuils sont variables et dépendantes de la localisation des sites, de la période de l'année, des espèces concernées.

- **D'autres conditions météorologiques** : l'activité des chiroptères est également corrélée à d'autres variables météorologiques telles que la pression atmosphérique, l'humidité relative, le taux de précipitation, la couverture nuageuse, le brouillard ou encore le rayonnement lunaire (Behr *et al.* 2017, Heim *et al.* 2016, Voigt *et al.* 2015, Cryan *et al.* 2014, Limpens *et al.* 2013, Amorim *et al.* 2012, Behr *et al.* 2011, Brinkmann *et al.* 2011, Baerwald and Barclay 2011, O'Donnell *et al.* 2010, Bach & Bach 2009, Horn *et al.* 2008, Kerns *et al.* 2005). Cependant, les opinions sur ces autres paramètres météorologiques sont d'autant plus mitigées. Il semble toutefois plus vraisemblable que ces paramètres influent de manière concomitante sur l'activité des chiroptères ou l'abondance d'insectes (Corten and Veldkamp 2001, Behr *et al.* 2011).

- **La hauteur de vol des chiroptères** : il existe une corrélation significative entre les espèces sensibles au risque de collision sur les parcs éoliens et leurs préférences en termes de hauteur de vol (Roemer *et al.* 2017).

Ainsi les espèces de chiroptères présentes en Europe peuvent être catégorisées en deux principaux groupes selon ce critère de hauteur de vol. D'une part, les espèces se déplaçant et chassant en plein ciel dites de « haut-vol » (molosse, noctules) et celles de lisières susceptibles d'évoluer régulièrement en hauteur (pipistrelles, minioptères, sérotines). Ces espèces sont considérées comme particulièrement sensibles au risque de collision (Dürr 2021). D'autre part, les espèces spécialistes et majoritairement associées aux milieux forestiers, bocagers ou humides qui dans la grande majorité de leurs déplacements restent à proximité des structures arborées et dépassent rarement la canopée (Barbastelle d'Europe, murins sp., oreillards sp., rhinolophes sp.). Ces espèces présentent un risque de collision avec les éoliennes assez faible (Dürr 2021).

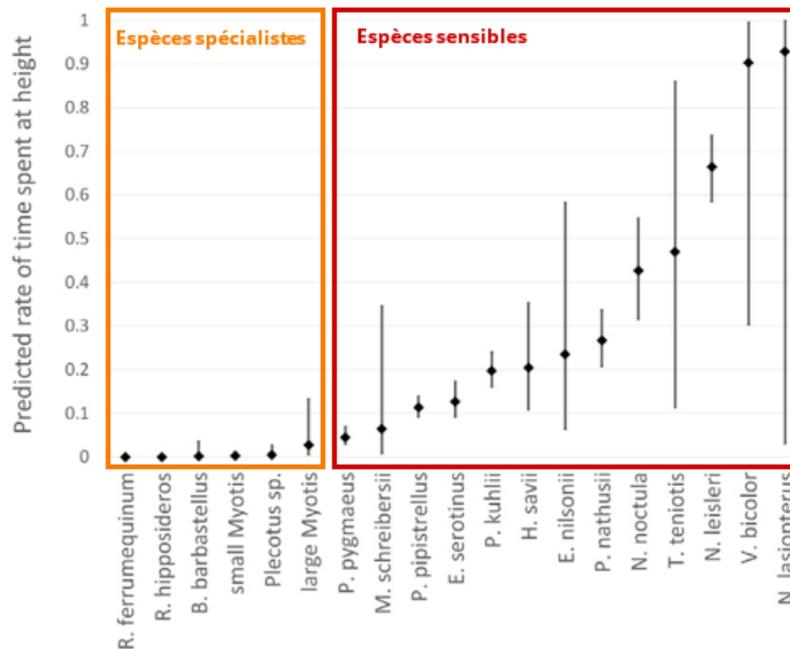


Figure 1 : Ratio du temps passé en hauteur pour chaque espèce de chiroptères (Adapté de Roemer et al. 2017).

- **Le cycle circadien** : ainsi, Behr et al. en 2017 ont démontré que l'activité des chiroptères est maximale pendant la première moitié de la nuit. Le groupe des noctules (principalement la Noctule commune) est actif avant le coucher du soleil, soit avant le groupe des pipistrelles. Après le premier quart de la nuit, l'activité commence à diminuer et ce continuellement jusqu'au lever du soleil, avec une diminution plus forte un peu avant le lever du soleil. Quelque fois un pic d'activité plus faible a été enregistré en fin de nuit, ce phénomène est principalement dû à l'activité des espèces de noctule. La Pipistrelle de Nathusius montre un schéma légèrement différent de celui des autres espèces avec une activité culminante au milieu de la nuit. Ces résultats sont observés sur des études de l'activité des chiroptères et peuvent varier en fonction de la saisonnalité (Arthur et Lemaire 2015, Newson et al. 2015, Labouré ENCIS Environnement 2021).

Le développement de l'éolien en France entraîne des modifications sur la biodiversité. La mise en place de plusieurs documents de référence pour une bonne prise en compte des chauves-souris dans l'implantation de parc éolien à l'exemple d'Eurobats en 2015 et de la SFEPM et 2016, permet ainsi de mieux cerner le comportement de chiroptères et d'anticiper les potentiels risques liés à cette source d'énergie récente. Plusieurs articles sur les comportements des chauves-souris dans le contexte éolien voient alors le jour pour essayer de



comprendre au mieux les variables les influençant (Kelm *et al.* 2014, Lacoeyllhe *et al.* 2016, O'Shea *et al.* 2016, Heim *et al.* 2016, Roemer *et al.* 2017, Minderman *et al.* 2017, Barré 2017).

1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le jeu de données est composé de 234 979 données chiroptérologiques, enregistrées au-dessus de 70 m de hauteur sur des mâts de mesures météorologiques et lors des saisons de 2015 à 2023. Elles sont issues de 60 sites d'inventaire dont la majorité d'entre eux est à tendances bocagères, puis forestières ou de grandes cultures. Ces secteurs sont représentatifs du grand centre ouest de la France. Les saisons sont réparties en fonction des différentes phases du cycle biologique des chiroptères, à savoir : les transits printaniers et gestation du 1/03 au 31/05, la mise-bas et élevage des jeunes du 1/06 au 15/08 et les transits automnaux et « swarming » du 16/08 au 31/10.

1.1. Collecte et analyse des sons

Le matériel utilisé est composé d'enregistreurs automatiques d'ultrasons de type SM2Bat et SM4Bat, munis de microphones SMMU1 et SMMU2 déportés au-dessus de 70 m de hauteur pour l'ensemble des résultats présenté dans cet article.

Les écoutes débutent entre trente minutes et une heure avant le coucher du soleil et s'arrêtent entre trente minutes et une heure après le lever. Les données sont récupérées mensuellement sur les sites d'étude. Par la suite, l'ensemble des données est converti à l'aide du logiciel kaleidoscope (Wildlife Acoustics), puis analysé par le logiciel Sonochiro (Biotope), permettant d'obtenir des indices de confiance de 0 à 10 par identification. Une vérification par un chiroptérologue de ces indices, à l'aide du logiciel Batsound, est ensuite effectuée afin d'avoir des proportions de groupes d'espèces ou d'espèces les plus représentatives possible.

1.2. Attribution des données météorologiques et horaires

Suite à la validation des pistes sonores de chiroptères, les données de vitesse de vent et de température sont associées à chaque son. Parallèlement, les horaires en fonction du coucher et du lever du soleil de chaque localité sont associés à chaque contact de chauves-souris.

1.3. Analyses menées sur le jeu de données

- Répartition des espèces en fonction de différentes périodes

Le nombre de contacts de chiroptères est réparti par espèce et analysé en fonction du cycle complet ainsi que de la mensualité. Celle-ci est représentée par un histogramme cumulé par mois afin d'observer les potentielles variabilités saisonnières. Une analyse de l'ensemble des contacts en fonction de la nuit d'enregistrement est enfin réalisée sur l'ensemble de la période

- Mise en parallèle des vitesses de vent et des températures nocturnes et de l'activité des chiroptères.

Ces graphiques sont constitués d'histogrammes des occurrences de données météorologiques nocturnes associées aux contacts chiroptérologiques cumulés.

- Répartition des contacts de chiroptères en fonction du cycle circadien.



Ces répartitions sont représentées par des cartes de chaleur réalisées via le logiciel R (package GGplot et Density). Ce gradient de chaleur est basé sur des densités de points, chaque point représentant un contact de chiroptère.

- Répartition de l'activité et de la diversité en fonction des paramètres d'habitats.

Ces répartitions ont été réalisées dans un rayon d'un kilomètre autour des mâts de mesures étudiés. Les variables prises en compte sont les assolements de Corine Land Cover 2018 pour les milieux ouverts (prairie, culture, etc.), de la BD Forêt V2 pour les boisements (feuillu, mixte et conifère), de la BD Bocage pour les haies, des réseaux hydrographiques pour les cours d'eau.

- Analyse statistique des variables citées précédemment.

Dans un premier temps, sur l'ensemble des variables pouvant influencer l'activité des chiroptères (Semaine, Jour, Vent, Température, Heure de la nuit, Proximité d'habitats favorables, Surface d'habitats dans rayon d'un kilomètre) des ACP ont été réalisées afin de comprendre la répartition des contacts de chiroptères en fonction de ces variables.

Des tests statistiques ont été menés afin de définir les variables influençant le plus l'activité des chiroptères. Ces tests sont des modèles de régressions linéaires multiples, avec la mise en place d'anova et tests de corrélation. Des tests complémentaires de comparaison deux à deux via des régressions linéaires et des tests de Tukey ont été également réalisés pour certaines variables.

1.4. Limites de l'étude

Au cours de cette étude certaines limites sont apparues :

- la présence de parasites et la fiabilité d'identification ;
- la localité des sites d'études : cette analyse est plutôt représentative du centre-ouest de la France et ne sera pas forcément transposable à l'échelle de l'ensemble de l'aire biogéographique ;
- la sous représentativité de l'hiver et du printemps : cette étude étant basée sur des suivis de l'activité en hauteur, la période d'étude démarre généralement en mars et fini en octobre.

Limites méthodologiques	Réduction de la limite
Présence de parasites et fiabilité d'identification	Vérification poussée par un chiroptérologue via Batsound
Localisation des sites d'études et des éoliennes	Représentatif du centre ouest de la France
	Ne pas extrapoler à l'aire biogéographique
Printemps et hiver sous représentés	Jeu de données important
	Pas de conclusion stable sur les périodes printanière et hivernale incomplètes

Tableau 1 : Réduction des limites méthodologiques

2. RÉSULTATS

2.1. Répartition des espèces en fonctions de différentes périodes

2.1.1. Analyse de la diversité spécifique sur le cycle complet

En compilant le jeu de données complet de 2015 à 2023, on constate que la répartition des contacts des différentes espèces de chiroptères sur le cycle complet affiche une dominance des Pipistrelles communes et de Kuhl avec 59 % des contacts enregistrés. Le second groupe d'espèce le plus contacté est celui des noctules avec un quart des contacts comprenant la Noctule de Leisler (22 %), la Noctule commune (5 %) et la Grande Noctule (2 %). La Sérotine commune et la Pipistrelle de Nathusius, bien que beaucoup moins contactées, affichent respectivement un minimum de 3 % des contacts enregistrés. Les autres espèces ou groupes d'espèces présentent un nombre de contacts inférieur à 4 %. À noter la présence, malgré la hauteur de positionnement du micro (> 70 m), de quelques Barbastelle d'Europe, d'Oreillards et de Murins.

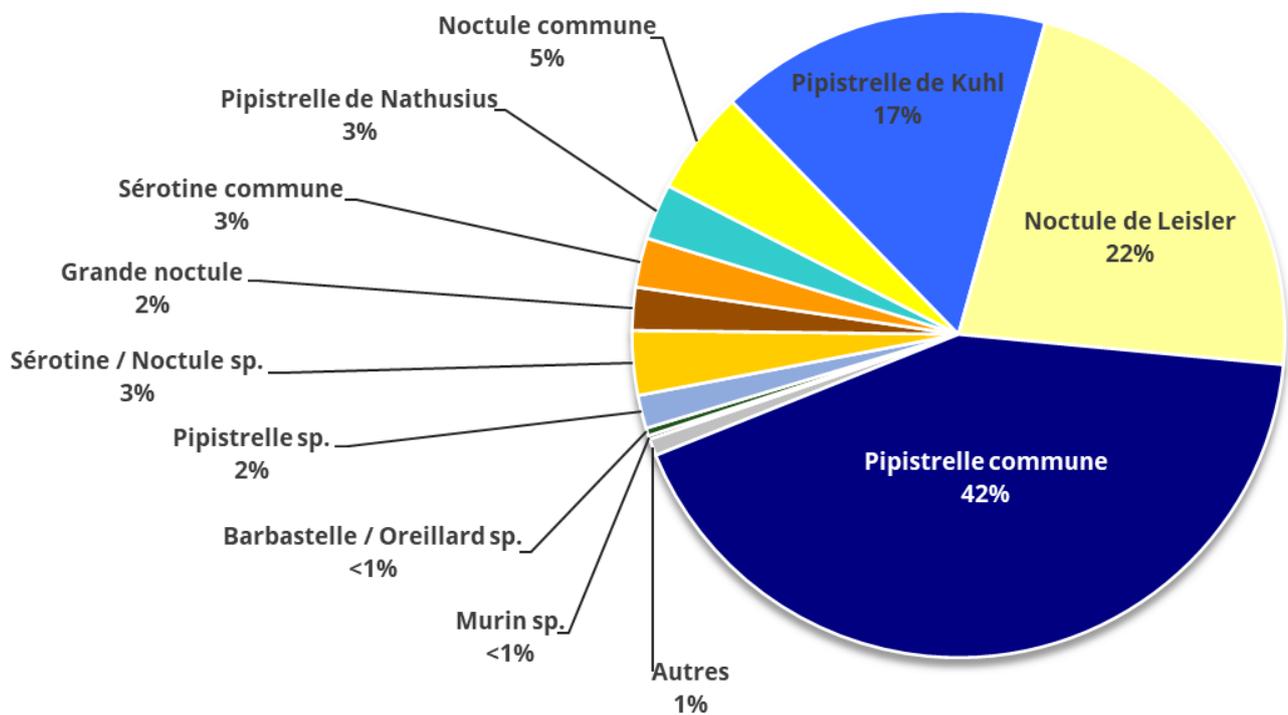


Figure 2 : Répartition des contacts de chiroptères sur le cycle complet

2.1.2. Analyse de l'activité des chiroptères par phase du cycle biologique

Dans un premier temps, les différentes phases du cycle biologique des chiroptères sont caractérisées par la sortie d'hibernation durant laquelle les femelles rejoignent les sites de gestation et de mise-bas du printemps. S'en suit donc la phase de mise-bas et d'élevage des jeunes qui nécessite un fort besoin en ressource alimentaire. Enfin, les transits automnaux et le « swarming » sont une phase de déplacements et de chasse intense pour rejoindre les sites d'accouplement ou « swarming », faire des réserves de graisses pour la période de léthargie et rejoindre les sites d'hibernation.

Ce graphique illustre les proportions d'activité des chiroptères enregistrées en hauteur pour chaque phase du cycle biologique. La période automnale concentre environ 40 % de l'activité totale, la période estivale 31 % et la période printanière 28 %. Sans surprise, la phase d'hibernation ne compte pas de contact.

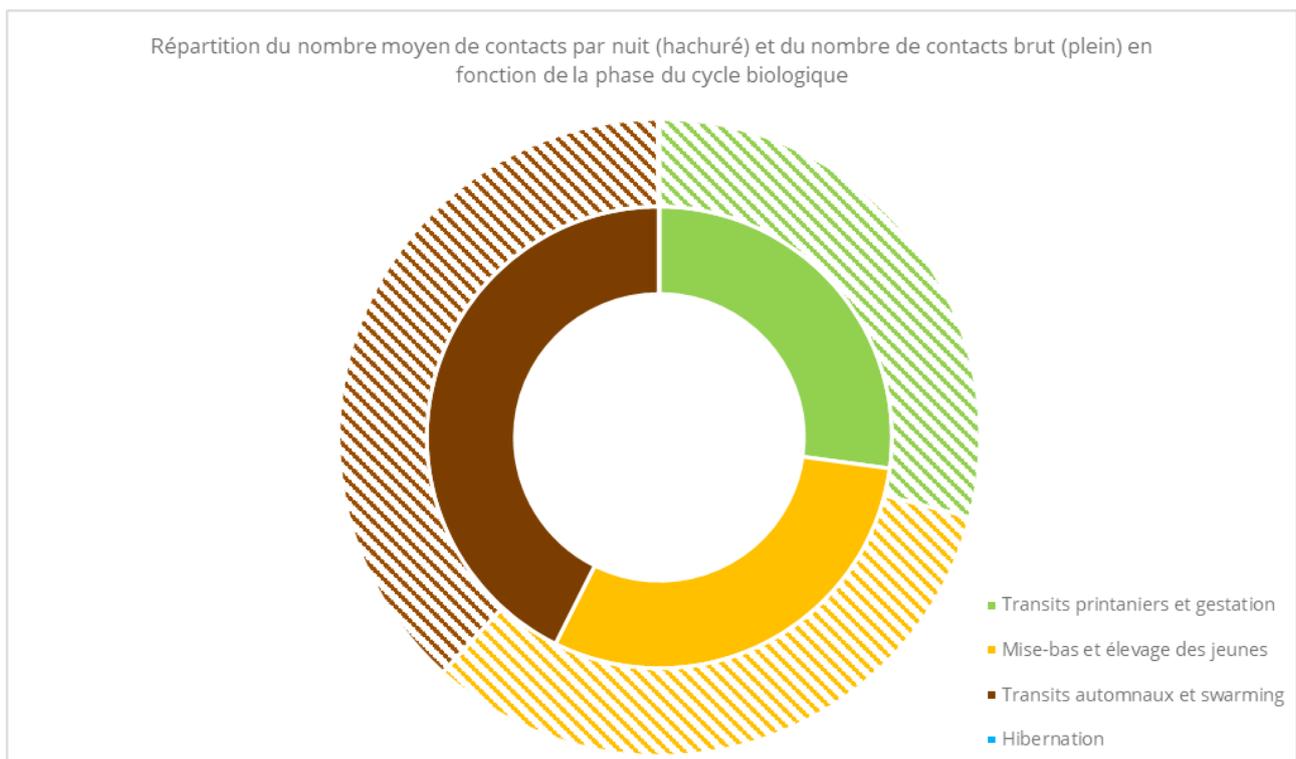


Figure 3 : Répartition des contacts de chiroptères en fonction de la phase du cycle biologique



2.1.3. Analyse de la diversité spécifique et de l'activité des chiroptères par mensualité sur le cycle complet

Afin d'analyser la répartition des différentes espèces de chiroptères au cours du cycle complet, une analyse mensuelle a été menée. Le graphique suivant illustre ainsi un histogramme cumulé des espèces contactées par mois d'inventaire. Les mois d'avril, juin, juillet, août et octobre affichent des proportions similaires entre les pipistrelles et les noctules/sérotines. Parallèlement, les mois de mai et septembre montrent des proportions nettement supérieures de pipistrelles par rapports aux noctules/sérotines. À noter que les mois affichant le plus de contacts (53 %) sont les mois d'août et de septembre. Ces mois montrent également le plus de contacts de Pipistrelle de Nathusius, espèce connue pour être une migratrice de longues distances.

Au cours du cycle complet, deux périodes clés se dessinent, à savoir la fin de la période de mise-bas et d'élevage des jeunes (juillet et début-août) ainsi que la période de transits automnaux et swarming (mi-août et septembre). Ces périodes apparaissent comme des périodes clés de l'activité chiroptérologique en hauteur.

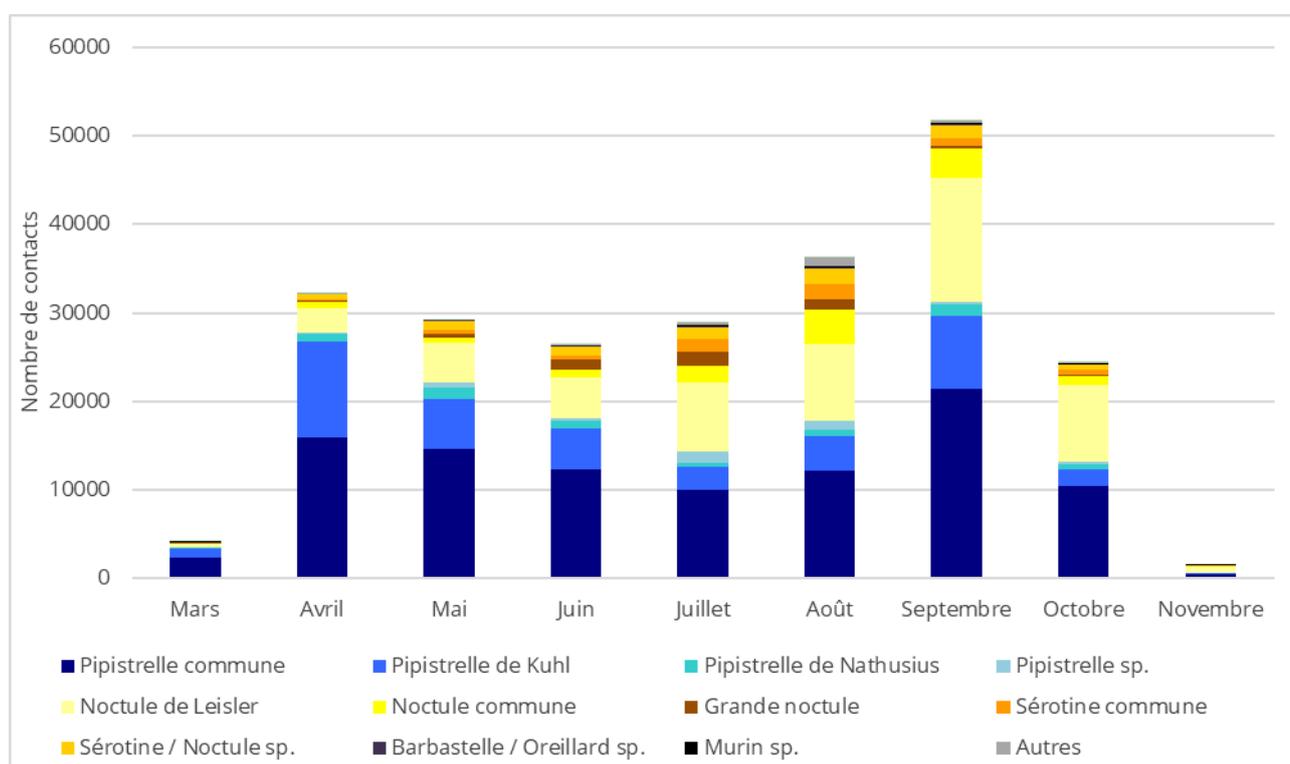


Figure 4 : Répartition des contacts de chiroptères en fonction de la mensualité



2.1.4. Analyse de l'activité journalière des chiroptères sur le cycle complet

La répartition des contacts de chiroptères a été affinée en fonction de la nuit d'enregistrement. Le nombre de contacts par nuit d'enregistrement est très variable et complexe à anticiper. Les pics d'activité apparaissent de plus en plus récurrents au fil de l'année.

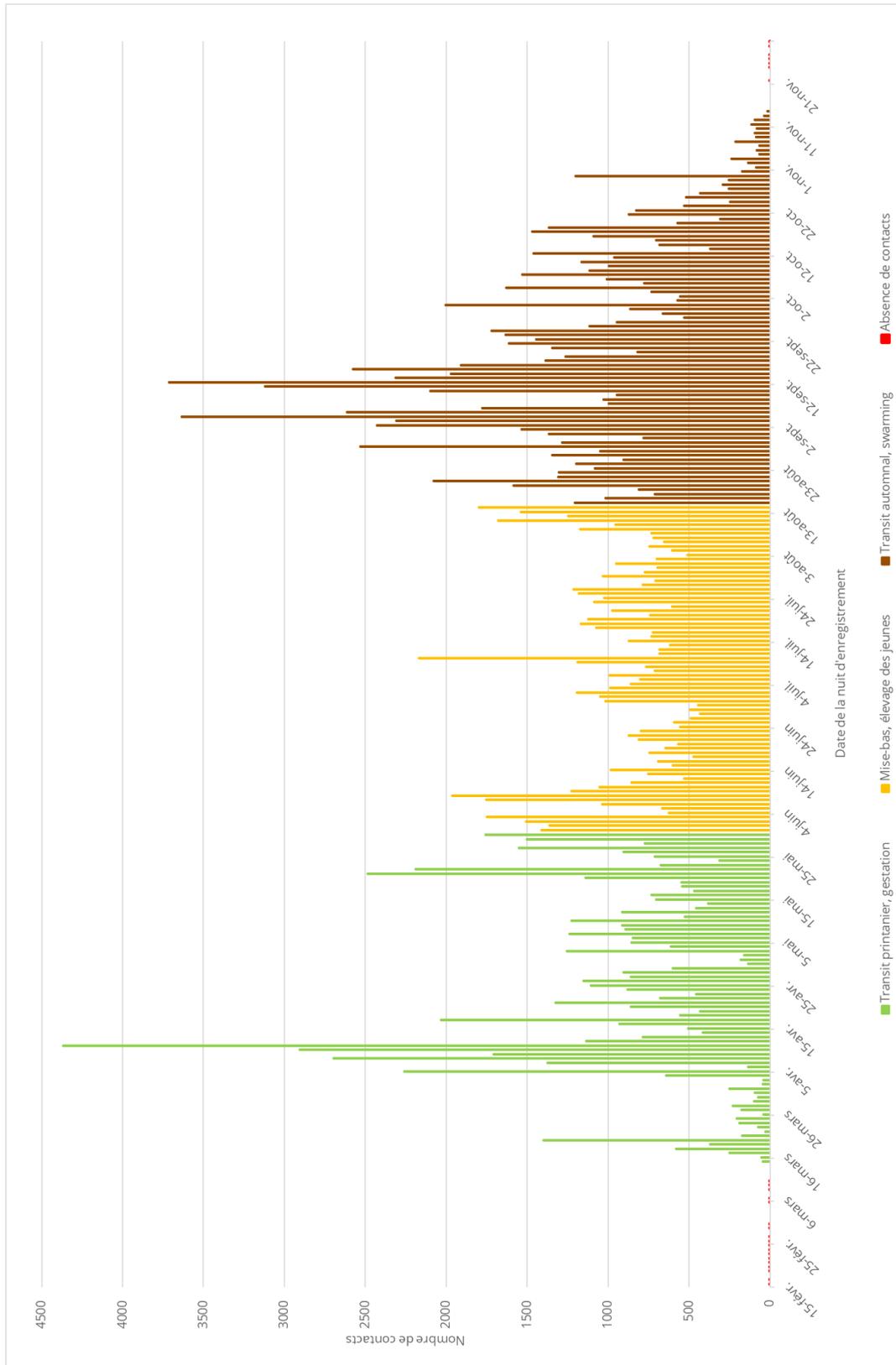


Figure 5 : Répartition des contacts de chiroptères en fonction de la nuit d'enregistrement

2.2. Mise en parallèle des données météorologiques et de l'activité chiroptérologique

2.2.1. Analyse de la vitesse de vent en fonction de l'activité chiroptérologique

L'activité chiroptérologique représentée en orange est répartie sur l'ensemble des conditions de vent nocturnes disponibles. Une « sélection » des vents plus faibles est observable sur ce graphique avec un maximum de contacts à environ 3,5 m/s. Notons que des contacts de chauves-souris ont été détectés jusqu'à 13 m/s soit 47 km/h.

Afin de définir les valeurs de vitesse de vent qui apparaissent charnières pour l'activité des chiroptères, des tests statistiques ont été menés. Ainsi, les résultats affichent que le vent influence très significativement l'activité des chiroptères ($p\text{-value}=4^{e-12}$). Les contacts de chauves-souris se concentrent entre 1,5 m/s et 5 m/s. Ces valeurs caractérisent la diminution significative de l'activité des chiroptères en hauteur au-dessous de cette période seuil.

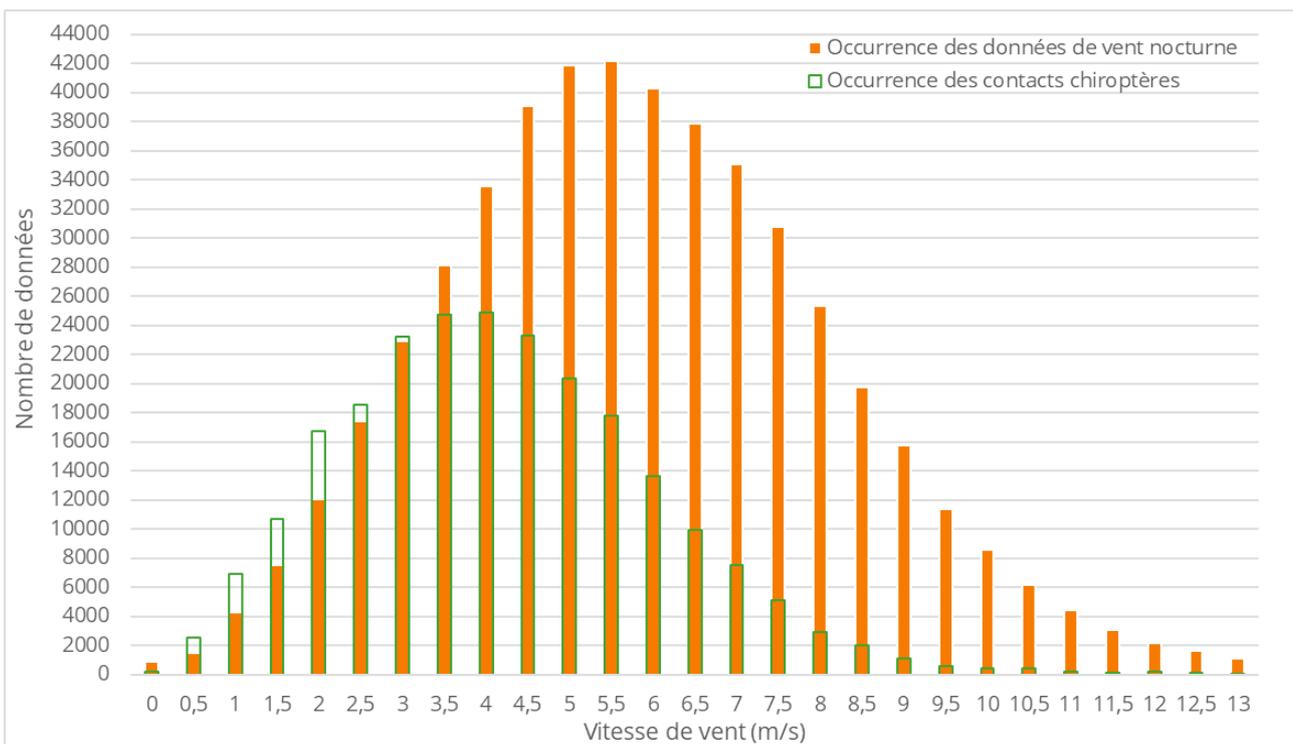


Figure 6 : Répartition de l'activité chiroptérologique en fonction des vitesses de vent nocturnes

2.2.2. Analyse de la température en fonction de l'activité chiroptérologique

La répartition des contacts de chiroptères sur l'histogramme des occurrences de températures nocturnes semble faire apparaître une sélection pour les températures plutôt élevées, avec un maximum de contacts à 15 et 16 °C. À noter que des chiroptères sont également contactés à des températures inférieures à 0 °C.

Afin de définir les valeurs de températures qui apparaissent charnières pour l'activité des chiroptères, des tests statistiques ont été menés. Les résultats montrent alors que la température influence très significativement l'activité des chiroptères ($p\text{-value}=8\text{e}^{-14}$). Les contacts de chauves-souris se concentrent entre 14 °C et 24 °C. Une plage charnière pour l'activité des chiroptères se dessine à 15°C. Cette valeur caractérise la diminution significative de l'activité des chiroptères en hauteur en-dessous de cette période seuil.

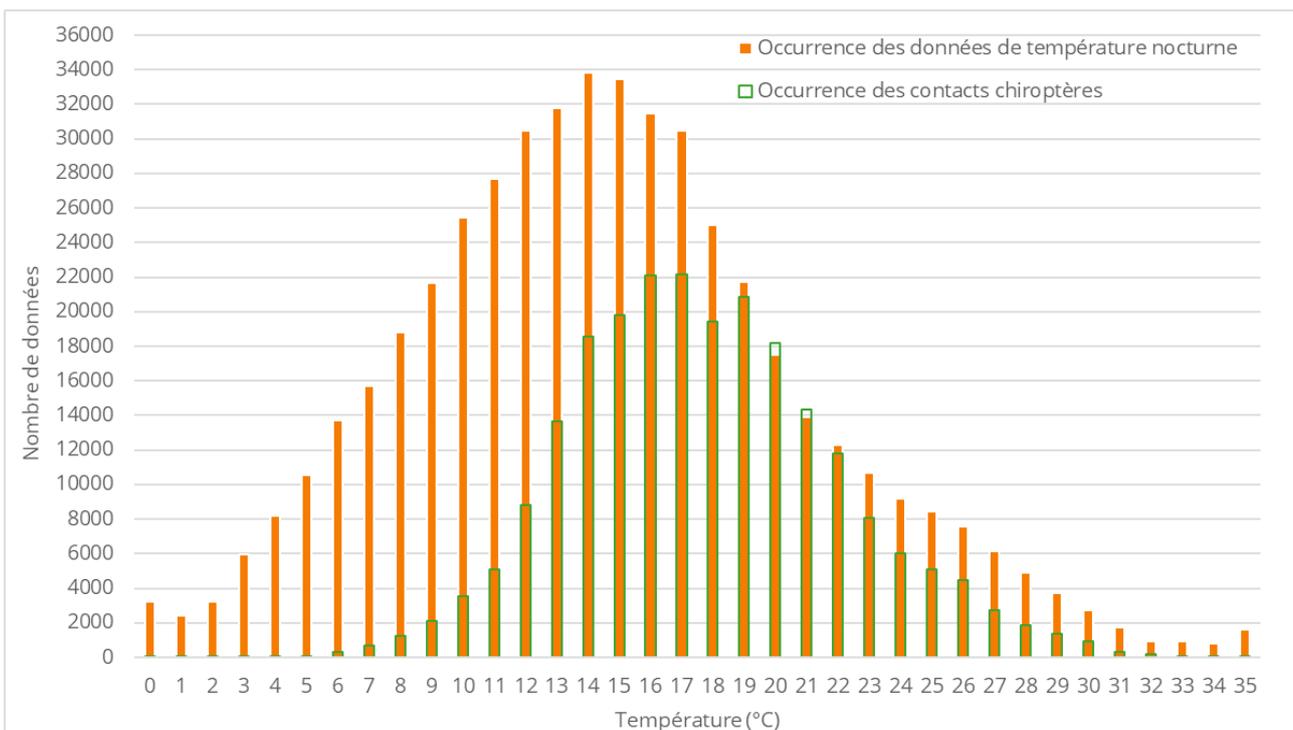


Figure 7 : Répartition de l'activité chiroptérologique en fonction des températures nocturnes

2.3. Répartition de l'activité en fonction du cycle circadien

Les densités de points sur le cycle complet d'étude montrent une activité concentrée en début de nuit sur l'ensemble du cycle. Une variabilité apparaît cependant en fonction des différentes périodes de l'année. Au cours du temps, une augmentation progressive de l'activité chiroptérologique tout au long de la nuit est observable jusqu'à la fin du mois de septembre, mois durant laquelle l'activité est la plus forte et la plus longue. Par la suite, une baisse d'activité progressive se dessine jusqu'à fin octobre (arrêt des inventaires acoustiques).

Quelques points chauds sont remarquables :

- une concentration de l'activité s'étend d'avril à octobre durant les trois à quatre premières heures de la nuit et dans une moindre mesure jusqu'au lever du soleil,
- un premier point chaud est observable en début de nuit dans le courant du mois de mai et s'étend jusqu'à cinq heures après le coucher du soleil,
- un second point chaud de mi-août à fin septembre affiche une activité élevée du coucher du soleil jusqu'à deux heures avant le lever du soleil. À noter un second point d'activité remarquable en fin de nuit (2 h avant le lever du soleil) début septembre,

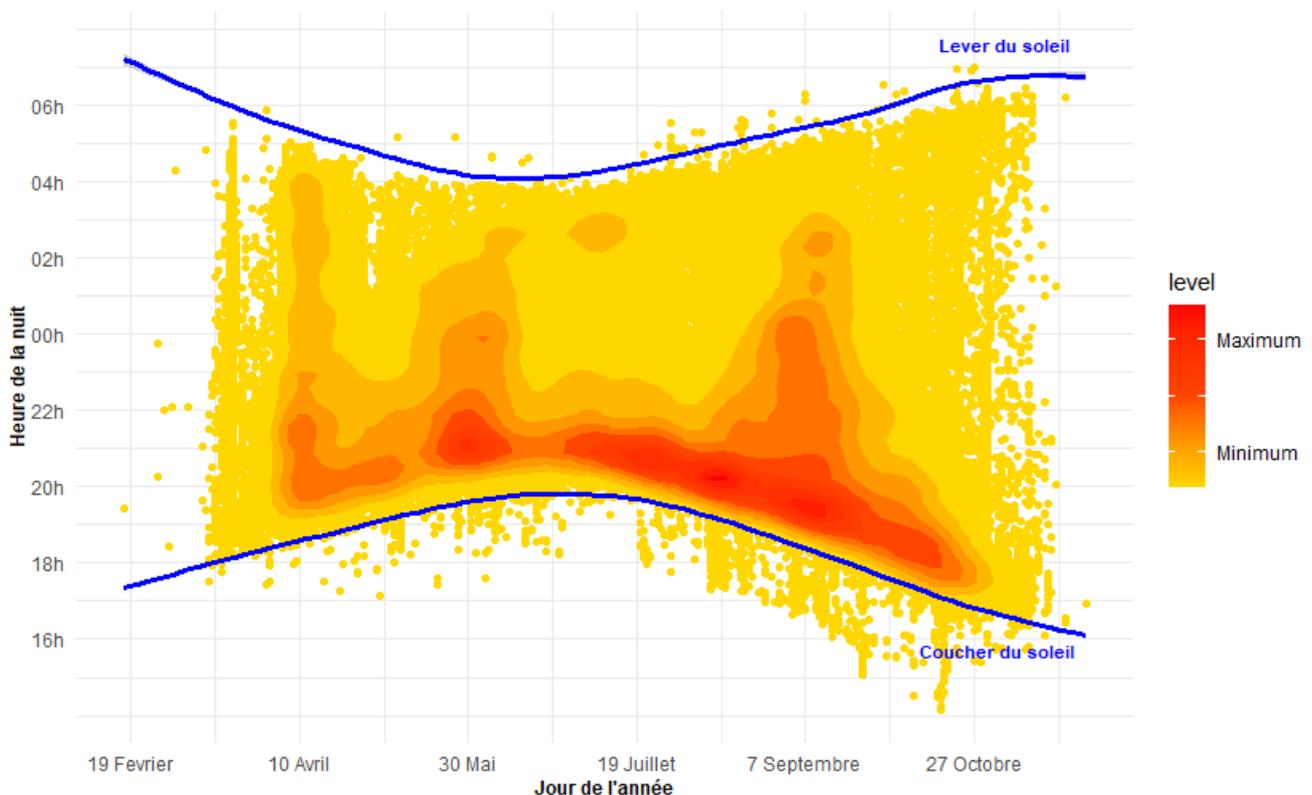


Figure 8 : Répartition de l'activité chiroptérologique en fonction du cycle circadien

Pour affiner ces résultats graphiques, des tests statistiques ont été menés pour définir les valeurs qui semblent être charnières pour l'activité des chiroptères. Les résultats affichent ainsi que l'heure de la nuit influence très significativement l'activité des chiroptères ($p\text{-value}=2^{e-16}$). Les contacts de chauves-souris se concentrent majoritairement entre le coucher du soleil et les quatre heures suivantes. Une période charnière pour l'activité des chiroptères se dessine entre 3h et 4h après le coucher du soleil. Ces horaires caractérisent la diminution significative de l'activité des chiroptères en hauteur au-dessus de cette période seuil.

2.4. Analyse multivariée de l'influence des variables temporelles et météorologiques sur l'activité des chiroptères

Afin d'observer au mieux le jeu de données, des ACP ont été réalisées sur l'ensemble des données. Le graphique suivant affiche les différentes variables sur deux dimensions (65 % explained variances). Ainsi, la majorité des variables apparaissent très explicatives pour le jeu de données. Les variables périodiques de Jour et de Semaine sont fortement corrélées entre elles et très explicatives du jeu de données. Les variables horaires (Classe_H) et de températures (Classe_T) sont également bien représentées. La variable de la vitesse de vent (Classe_V) est la moins bien représentée par ce cercle de corrélation. Enfin, hormis les variables temporelles entre elle, l'ensemble des variables sont indépendantes entre elles.

Les tests statistiques menés sur l'ensemble du jeu de données affichent une influence significative positive des deux variables périodiques ($p\text{-value}=2^e-16$) et de la température ($p\text{-value}=2^e-16$), une influence significative négative de l'heure de la nuit ($p\text{-value}=2^e-16$) et de la vitesse de vent ($p\text{-value}=2^e-16$).

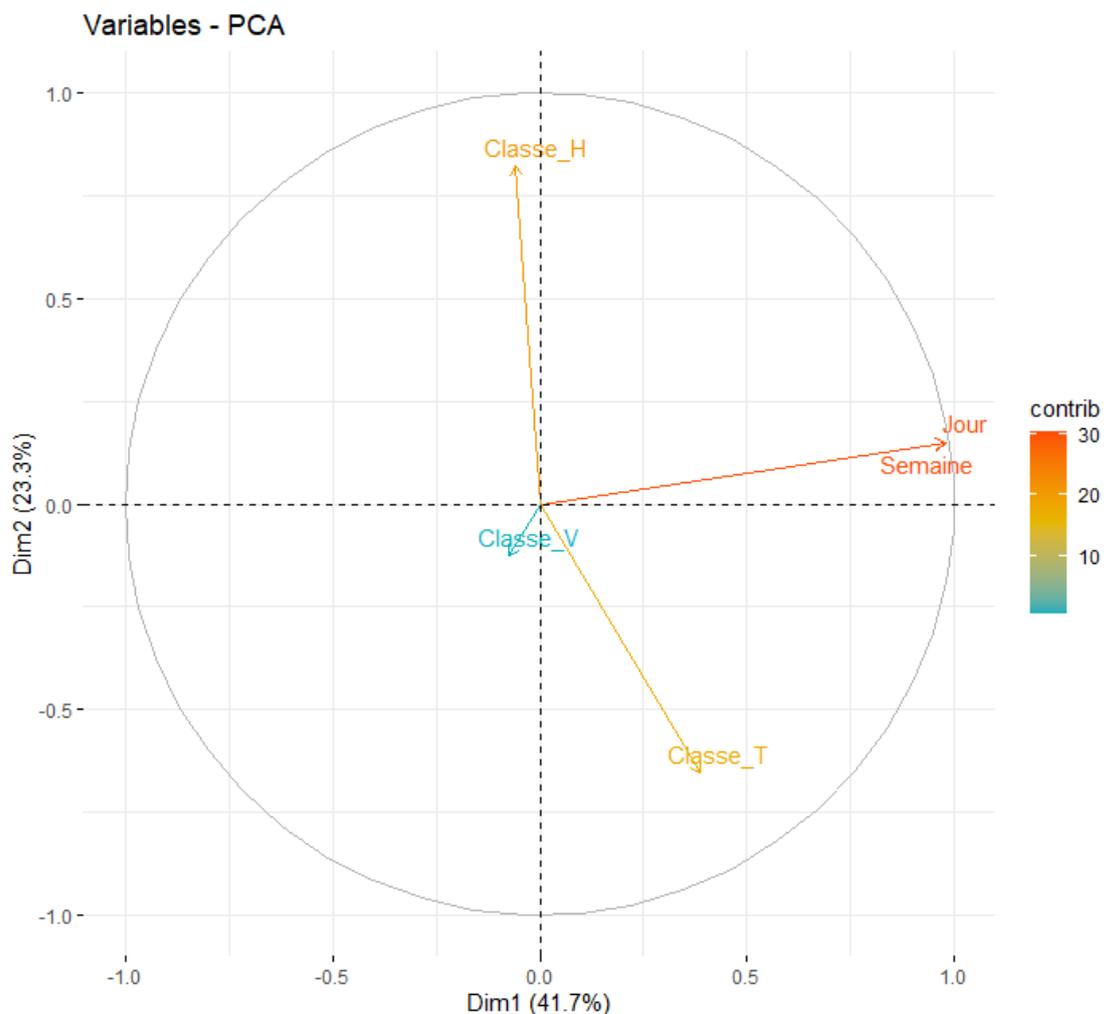


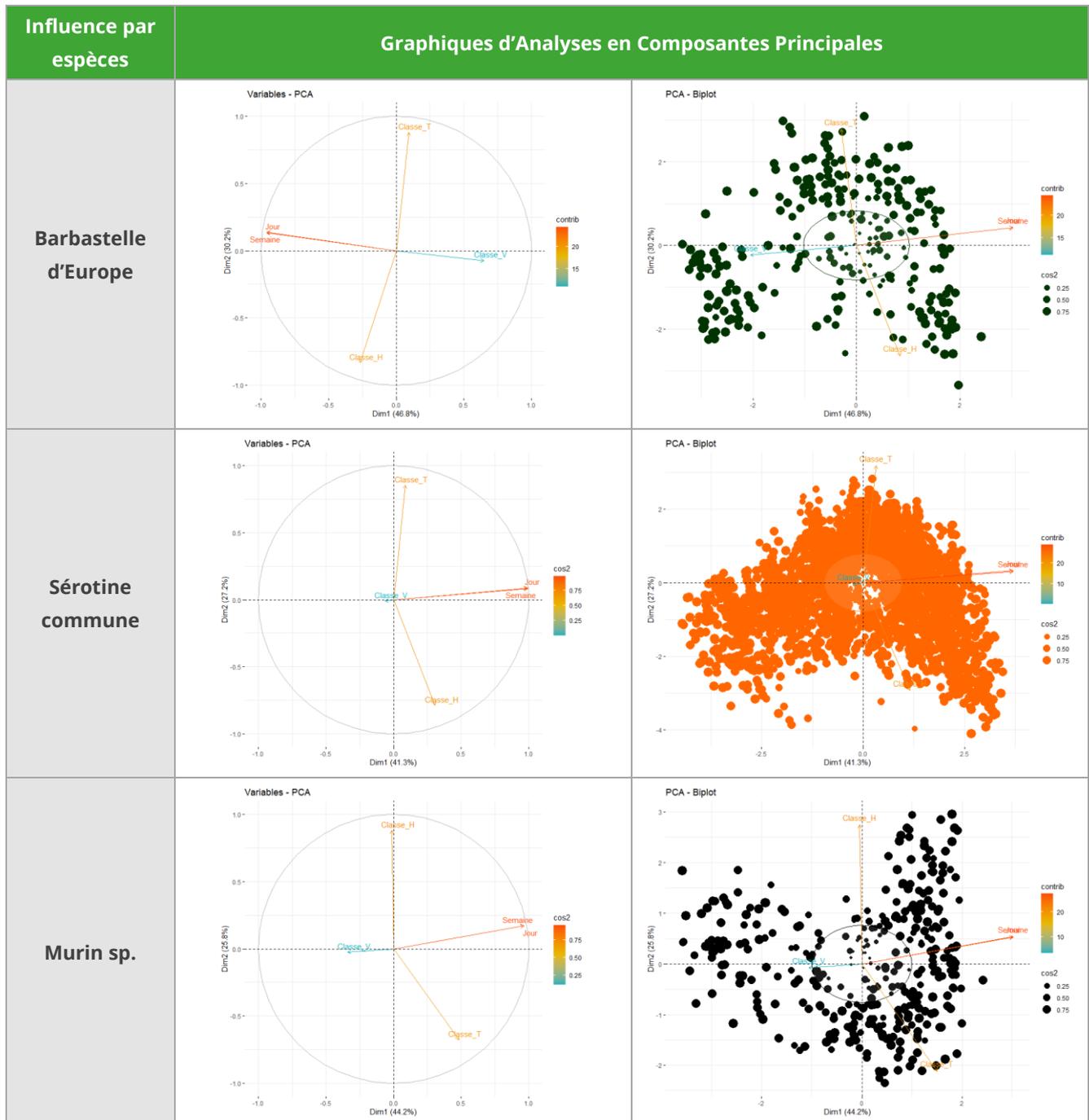
Figure 9 : Cercle de corrélation de l'analyse en composante principale (ACP) sur les variables périodiques et temporelles

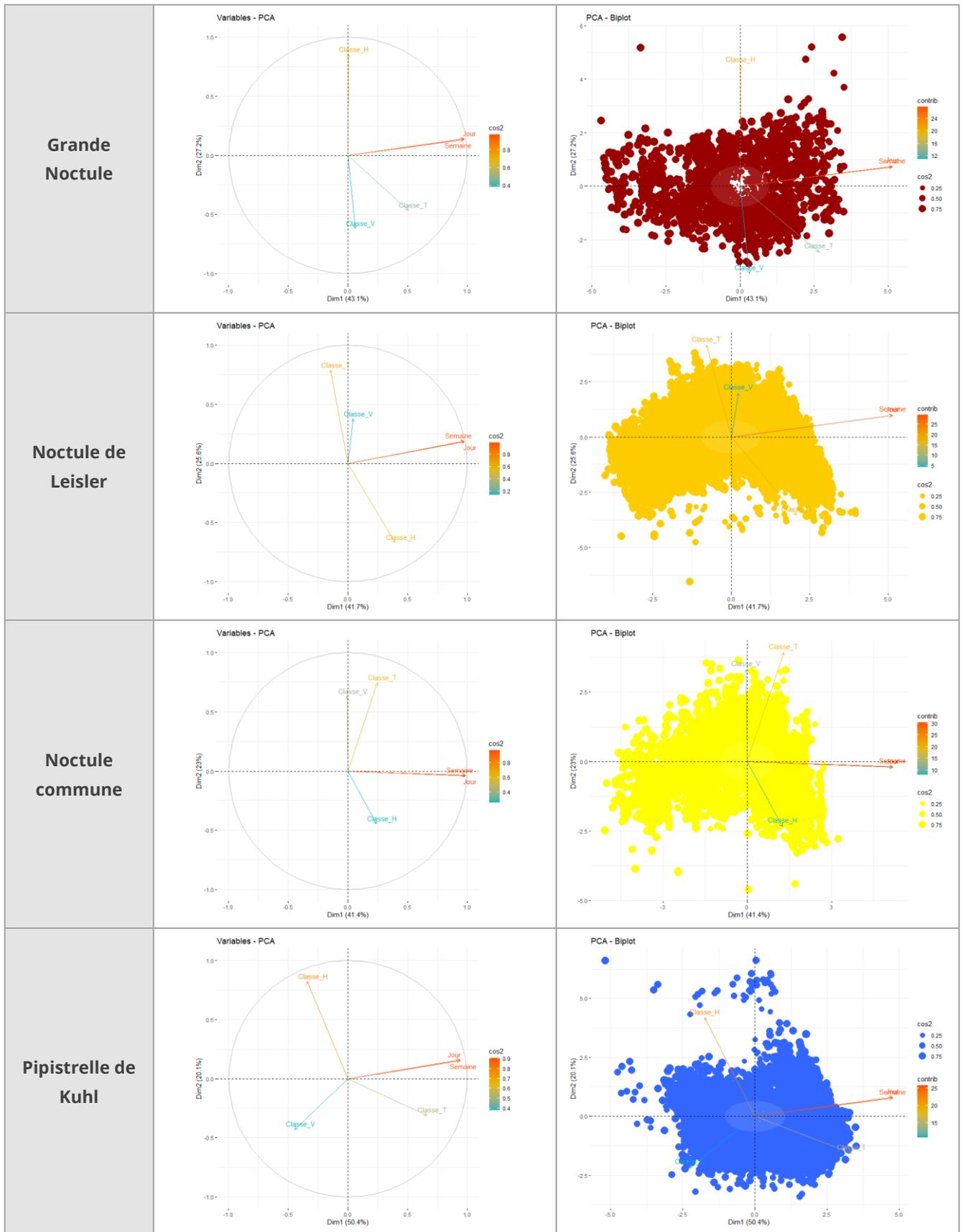


2.4.1. Analyse par espèces

Lorsque l'on observe la répartition des contacts de chiroptères par espèces en fonction de ces différentes variables (graphiques suivants), il apparaît que pour l'ensemble des espèces les variables les plus explicatives sont les variables périodiques (Semaine et Jour).

Dans un second temps, la répartition des contacts pour la majorité des espèces est expliquée par les variables horaires et température. À noter que plusieurs espèces affichent une influence plus marquée de la vitesse de vent sur la répartition des contacts de chiroptères notamment pour la Barbastelle d'Europe, la Grande Noctule, la Pipistrelle de Kuhl et la Pipistrelle de Nathusius.





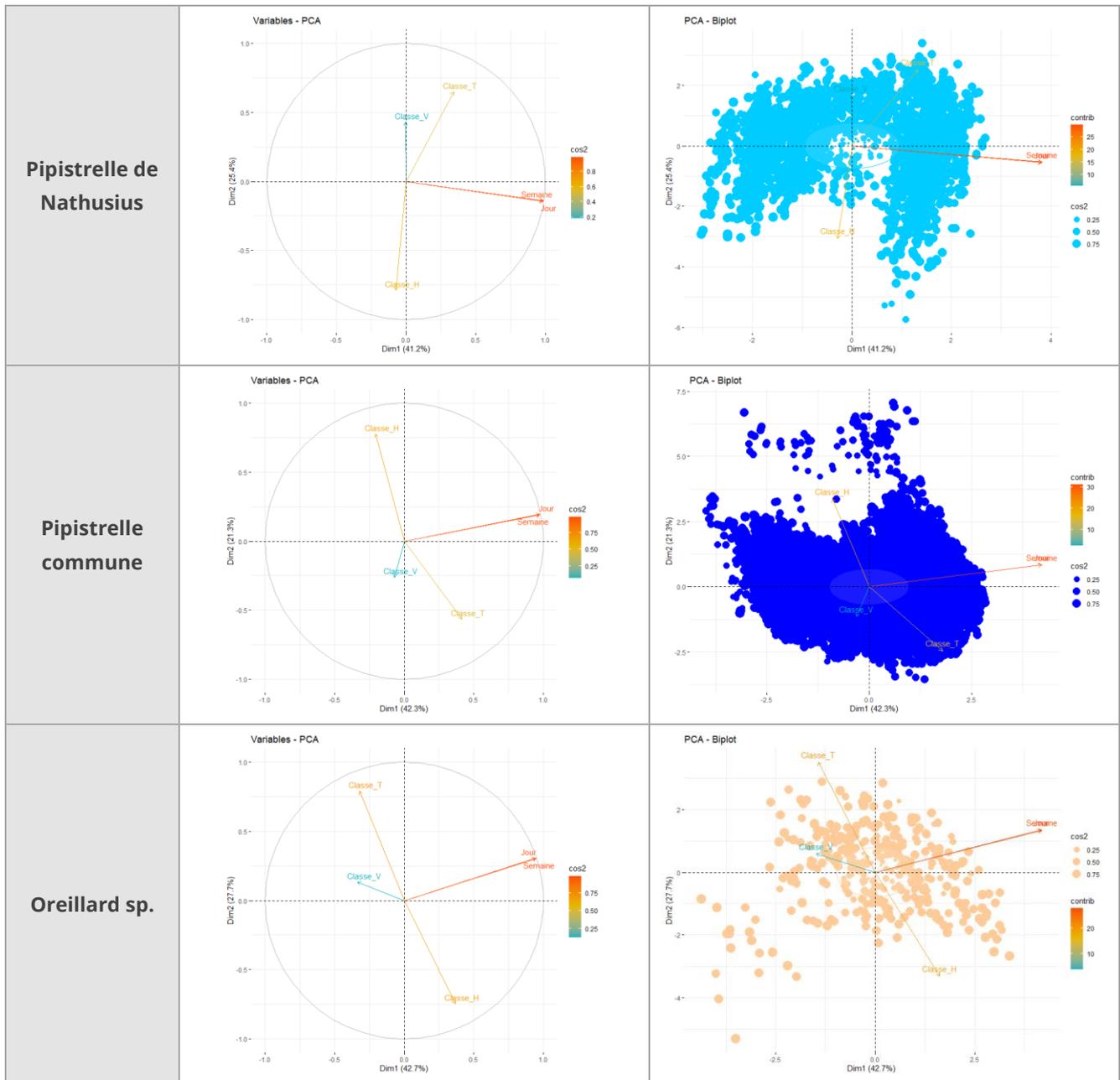


Figure 10 : ACP sur l'activité des chiroptères par espèces ou groupe d'espèces en fonction des variables périodiques et temporelles

Le tableau suivant synthétise les résultats des tests statistiques menés sur les données présentées ci-dessus.

La majorité des espèces affichent une influence significative positive de la période notamment pour la Barbastelle d'Europe, la Sérotine commune, la Noctule de Leisler, la Noctule commune et la Pipistrelle de Nathusius. A l'inverse l'influence de la période est significative négative pour la Grande Noctule, la Pipistrelle de Kuhl et la Pipistrelle commune.

L'influence de l'heure de la nuit est aussi majoritairement significative positive pour les espèces de chiroptères à savoir la Grande Noctule, la Noctule de Leisler, la Noctule commune, la Pipistrelle de Kuhl et le groupe des oreillards. A l'inverse l'heure de la nuit a une influence significative négative pour la Sérotine commune, la Pipistrelle de Nathusius et la Pipistrelle commune.



La température a une influence significative positive pour la Sérotine commune, la Grande Noctule, la Noctule commune et la Pipistrelle de Kuhl et une influence significative négative pour la Barbastelle d'Europe, le groupe des murins, la Noctule de Leisler, la Pipistrelle de Nathusius et la Pipistrelle commune.

La vitesse de vent a une influence significative négative pour l'ensemble des espèces étudiées.

Les résultats sont non significatifs pour la période pour le groupe des murins et le groupe des oreillards, pour l'heure de la nuit pour la Barbastelle d'Europe et le groupe des murins et pour la température pour le groupe des oreillards.

Espèce/Variable	Période (Semaine / Jour)	Heure de la nuit	Température	Vitesse de vent
Barbastelle d'Europe	Influence significative positive (p-value=0,01)	Influence non significative	Influence significative négative (p-value=5 ^e -05)	Influence significative négative (p-value=5,32 ^e -05)
Sérotine commune	Influence significative positive (p-value=2,2 ^e -16)	Influence significative négative (p-value=2,2 ^e -16)	Influence significative positive (p-value=2,2 ^e -16)	Influence significative négative (p-value=1,5 ^e -14)
Murin sp.	Influence non significative	Influence non significative	Influence significative négative (p-value=1,2 ^e -07)	Influence significative négative (p-value=7,9-06)
Grande Noctule	Influence significative négative (p-value=2,2 ^e -16)	Influence significative positive (p-value=0,007)	Influence significative positive (p-value=2,2 ^e -16)	Influence significative négative (p-value=2,2 ^e -16)
Noctule de Leisler	Influence significative positive (p-value=0,001)	Influence significative positive (p-value=2,2 ^e -16)	Influence significative négative (p-value=1,09 ^e -13)	Influence significative négative (p-value=0,006)
Noctule commune	Influence significative positive (p-value=2,8 ^e -15)	Influence significative positive (p-value=2,2 ^e -16)	Influence significative positive (p-value=2,2 ^e -16)	Influence significative négative (p-value=3,9 ^e -07)
Pipistrelle de Kuhl	Influence significative négative (p-value=2,2 ^e -16)	Influence significative positive (p-value=2,2 ^e -16)	Influence significative positive (p-value=4, ^e -5)	Influence significative négative (p-value=2,2 ^e -16)
Pipistrelle de Nathusius	Influence significative positive (p-value=4,2 ^e -6)	Influence significative négative (p-value=2,2 ^e -16)	Influence significative négative (p-value=0,02)	Influence significative négative (p-value=2,2 ^e -16)
Pipistrelle commune	Influence significative négative (p-value=5,6 ^e -12)	Influence significative négative (p-value=2,2 ^e -16)	Influence significative négative (p-value=2,2 ^e -16)	Influence significative négative (p-value=2,2 ^e -16)
Oreillard sp	Influence non significative	Influence significative positive (p-value=0,007)	Influence non significative	Influence significative négative (p-value=2,2 ^e -16)

Tableau 2 : Résultats des tests statistiques par espèce ou groupe d'espèces en fonction des variables périodiques et temporelles

2.5. Répartition des contacts de chiroptères en fonction des distances et des surfaces d'habitats

2.5.1. Répartition des contacts en fonction de la proximité d'habitats favorables

2.5.1.1 Proximité aux haies

Le graphique suivant représente la répartition de l'activité des chiroptères en fonction de la distance à la haie la plus proche. Une courbe de pourcentage cumulé a également été représentée sur le graphique et permet d'observer que 95 % des contacts sont enregistrés sur des mâts de mesures installés à une distance inférieure à 500 m d'une haie. À noter également que 60 % des contacts se trouvent à une distance comprise entre 0 et 100 m des haies les plus proches.

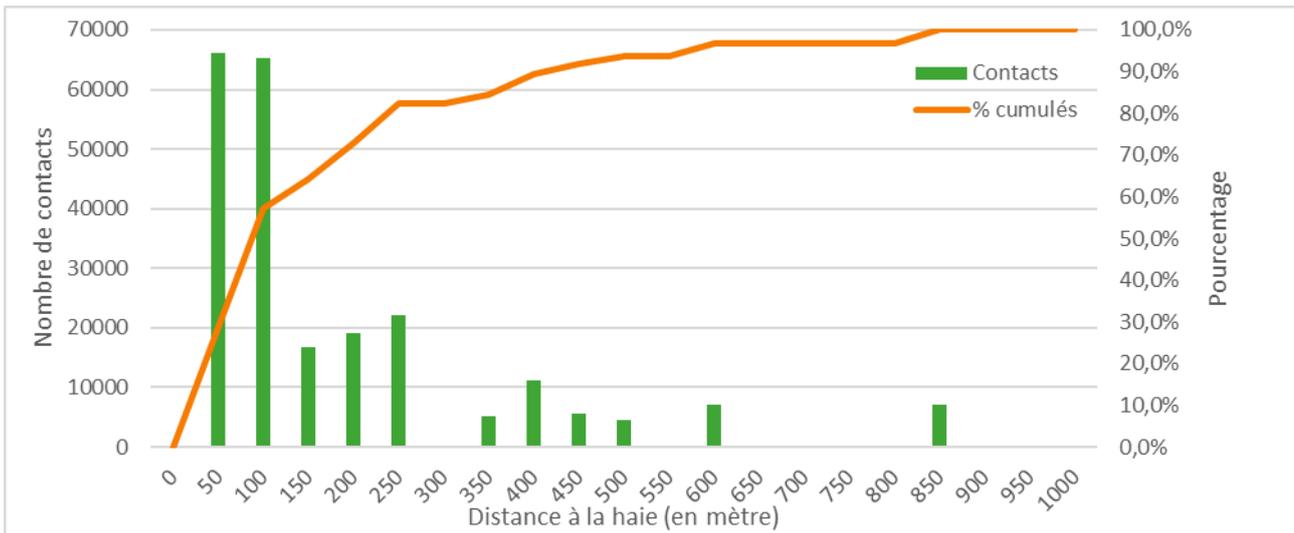


Figure 11 : Répartition des contacts de chiroptères en fonction de la distance à la haie la plus proche

2.5.1.2 Proximité aux boisements

Le graphique suivant représente la répartition de l'activité des chiroptères en fonction de la distance au boisement le plus proche. Une courbe de pourcentage cumulé a également été représentée sur le graphique et permet d'observer que 95 % des contacts sont enregistrés sur des mâts de mesures à une distance inférieure à 400 m. À noter également que 80 % des contacts se trouvent à une distance comprise entre 0 et 250 m des boisements les plus proches.

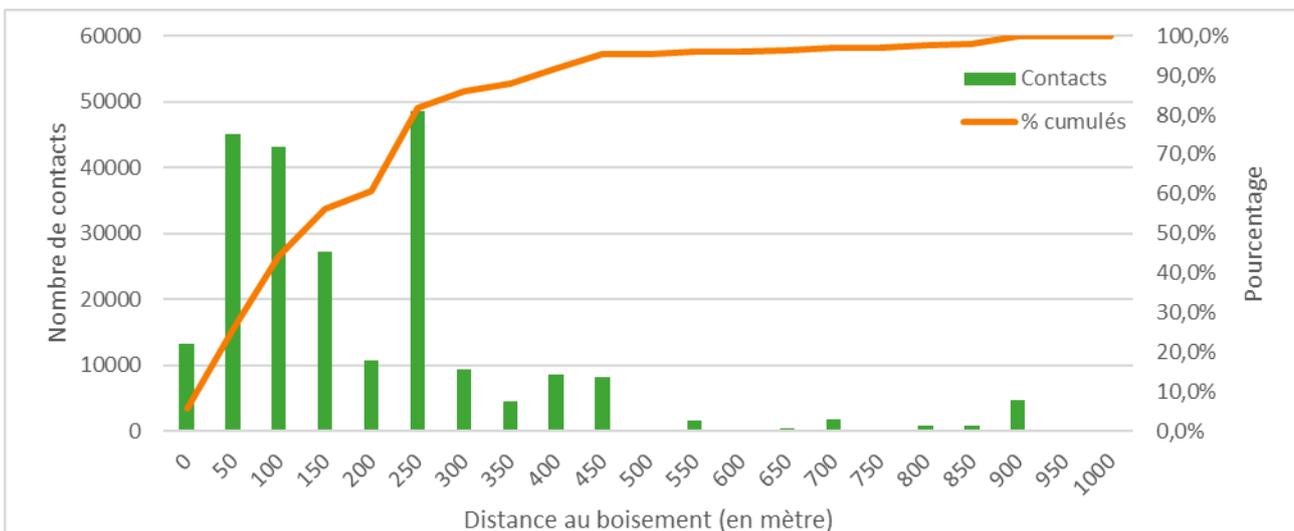


Figure 12 : Répartition des contacts de chiroptères en fonction de la distance au boisement le plus proche

2.5.1.3 Proximité au réseau hydrographique

Le graphique suivant représente la répartition de l'activité des chiroptères en fonction de la distance au cours d'eau le plus proche. Une courbe de pourcentage cumulé a également été représentée sur le graphique et permet d'observer que 95 % des contacts sont enregistrés sur des mâts de mesures à une distance inférieure à 900 m. À noter également que près de 60 % des contacts se trouvent à une distance comprise entre 0 et 350 m des cours d'eau les plus proches.

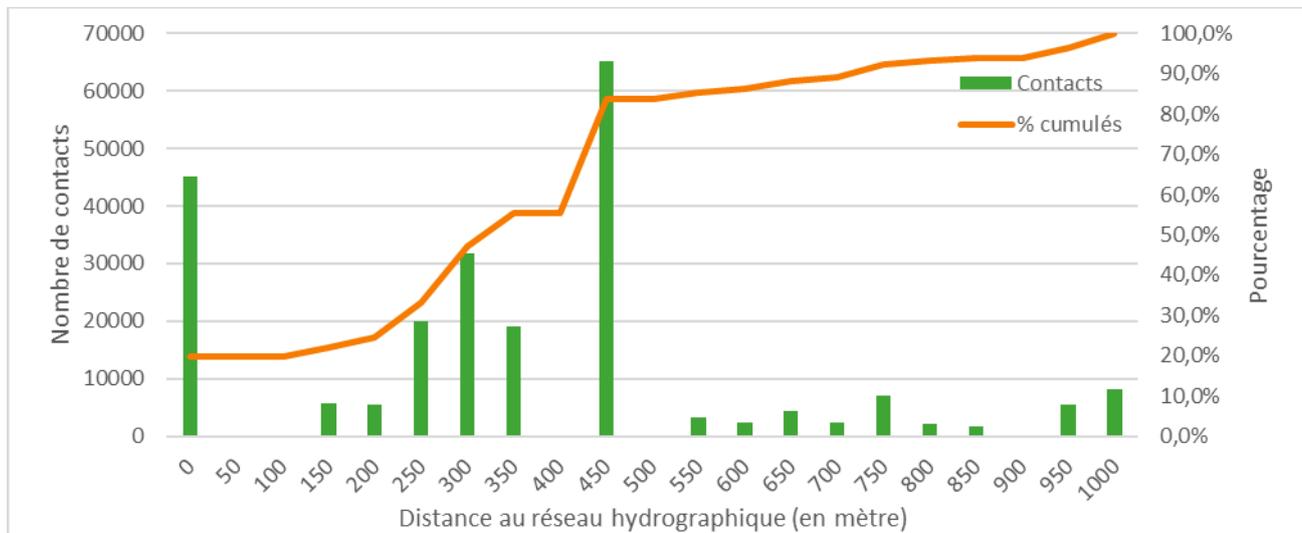


Figure 13 : Répartition des contacts de chiroptères en fonction de la distance au cours d'eau le plus proche

2.5.2. Répartition des contacts en fonction des proportions d'habitats naturels environnants

Les graphiques suivants se basent sur la proportion d'habitats naturels présents dans un rayon d'un kilomètre autour des mâts de mesures. Pour les variables linéaires (haies et cours d'eau), la longueur totale cumulée dans le rayon d'un kilomètre a été réalisée. Pour les variables surfaciques, la surface totale dans un rayon d'un kilomètre a été calculée.

2.5.2.1 Longueur cumulée de haie

Le graphique suivant représente la répartition de l'activité des chiroptères en fonction de la longueur totale de haies dans un rayon d'un kilomètre autour des mâts de mesure. Une courbe de pourcentage cumulé a également été représentée sur le graphique et permet d'observer que 95 % des contacts ont été réalisés sur des mâts de mesures avec plus de 27 km de haie dans un rayon d'un kilomètre.

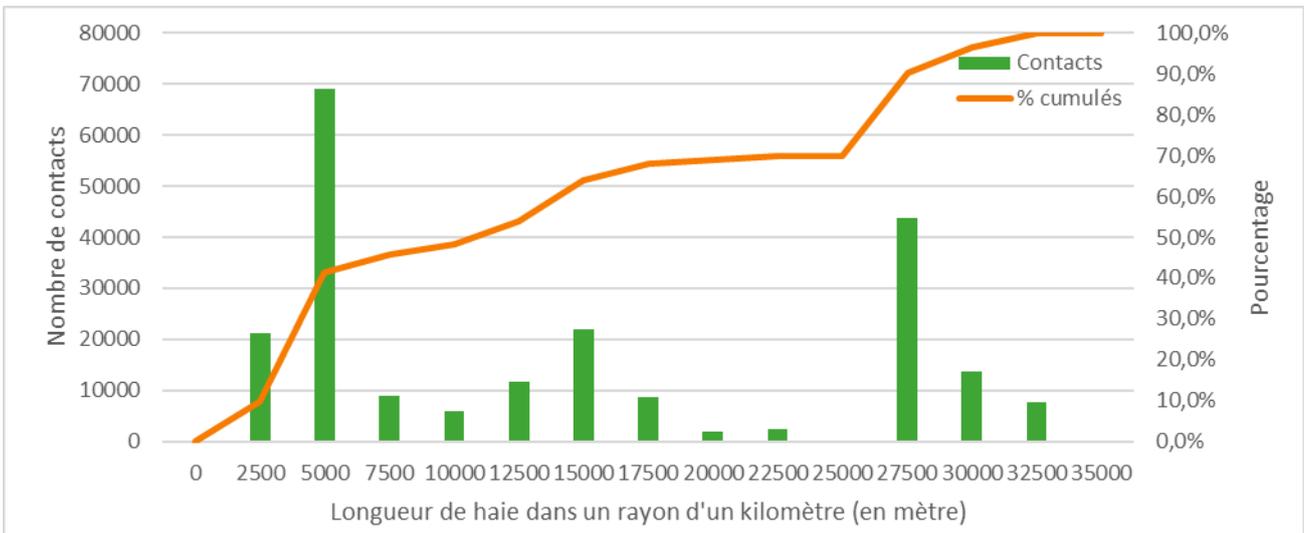


Figure 14 : Répartition des contacts de chiroptères en fonction de la longueur de haie cumulée dans un rayon d'un kilomètre

2.5.2.2 Longueur cumulée de cours d'eau

Le graphique suivant représente la répartition de l'activité des chiroptères en fonction de la longueur totale de cours d'eau dans un rayon d'un kilomètre autour des mâts de mesures. Une courbe de pourcentage cumulé a également été représentée sur le graphique et permet d'observer que 95 % des contacts ont été enregistrés sur des mâts de mesures avec 5 km de cours d'eau dans un rayon d'un kilomètre (équivalent à 314 ha en tout).

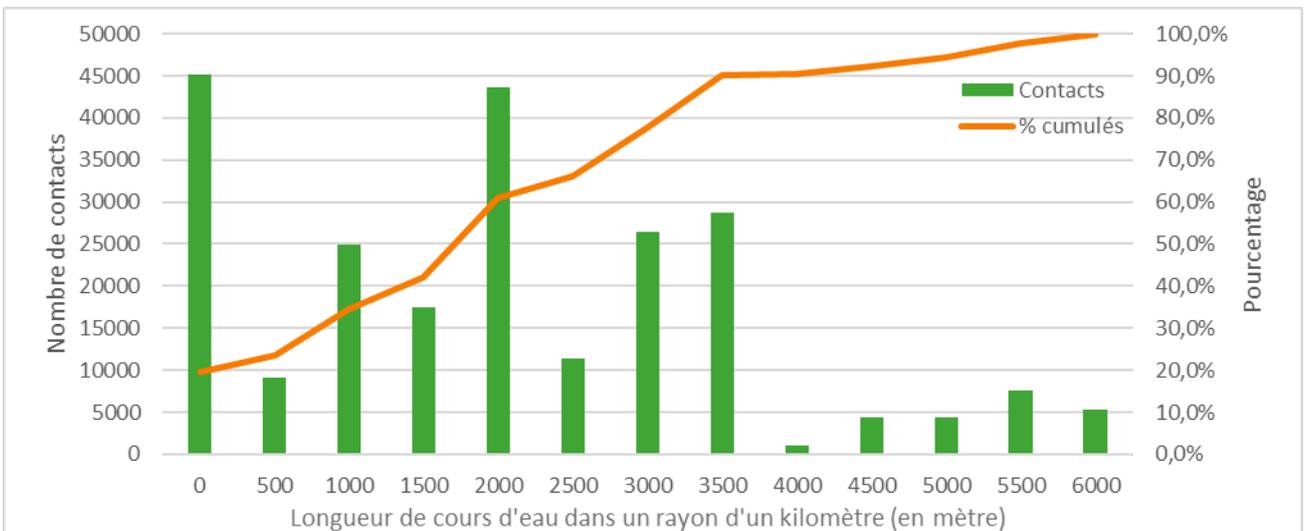


Figure 15 : Répartition des contacts de chiroptères en fonction de la longueur de cours d'eau cumulée dans un rayon d'un kilomètre

2.5.2.3 Surface de boisements

Le graphique suivant représente la répartition de l'activité des chiroptères en fonction de la surface totale de boisements dans un rayon d'un kilomètre autour des mâts de mesure. Une courbe de pourcentage cumulé a également été représentée sur le graphique et permet d'observer que 95 % des contacts ont été enregistrés sur des mâts de mesures avec moins de 210 ha de boisement dans un rayon d'un kilomètre (équivalent à 314 ha en tout).

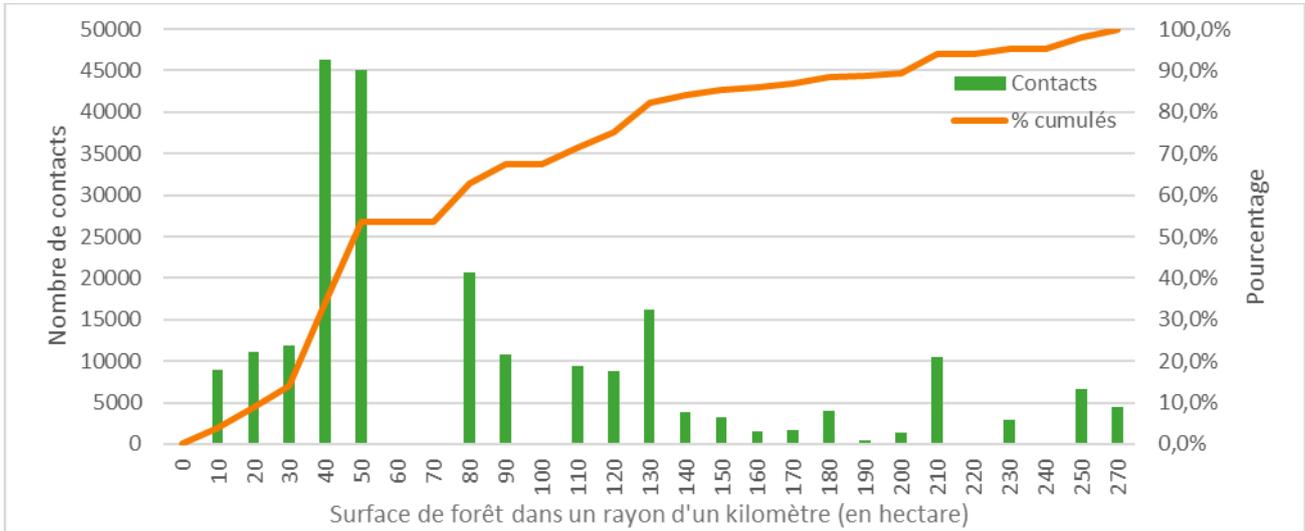


Figure 16 : Répartition des contacts de chiroptères en fonction de la surface de boisement dans un rayon d'un kilomètre

Les boisements ont également fait l'objet d'une analyse détaillée en fonction du type de boisement : feuillu, mixte ou conifère. Le graphique suivant représente la répartition de l'activité des chiroptères en fonction de la surface totale des trois différents types de boisements détaillés ci-dessus dans un rayon d'un kilomètre autour des mâts de mesures. Les résultats observés apparaissent similaires quel que soit le type de boisement concerné.

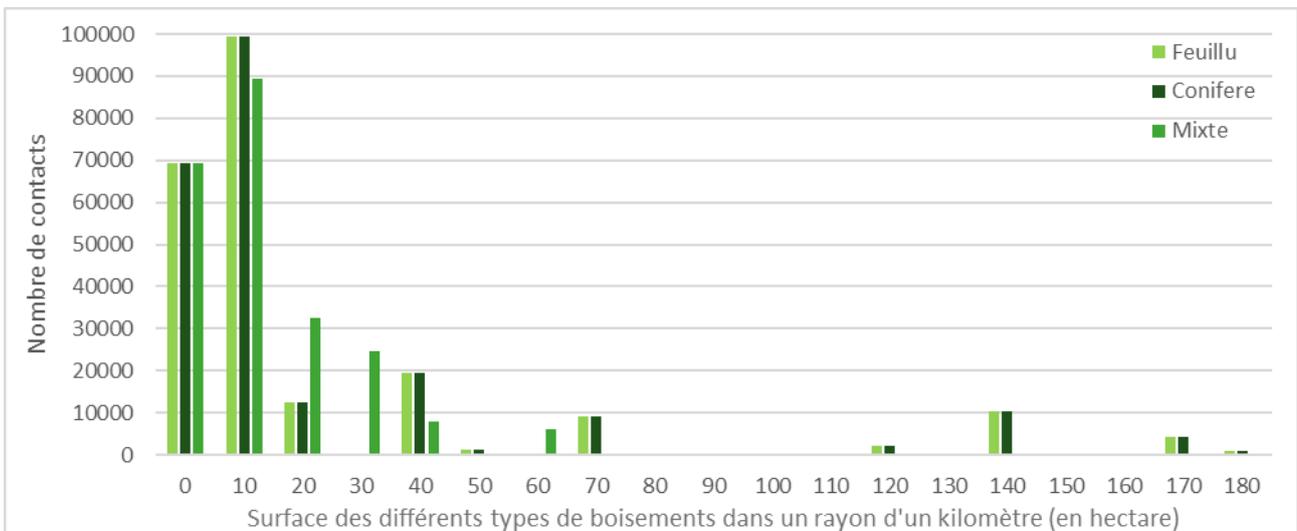


Figure 17 : Répartition des contacts de chiroptères en fonction de la surface du type de boisement dans un rayon d'un kilomètre

2.5.2.4 Surface de milieux ouverts

Le graphique suivant représente la répartition de l'activité des chiroptères en fonction de la surface totale de milieux ouverts dans un rayon d'un kilomètre autour des mâts de mesures. Une courbe de pourcentage cumulé a également été représentée sur le graphique et permet d'observer que 95 % des contacts se trouvent sur des mâts de mesures avec moins 325 ha de milieux ouverts dans un rayon d'un kilomètre (équivalant à 314 ha en tout).

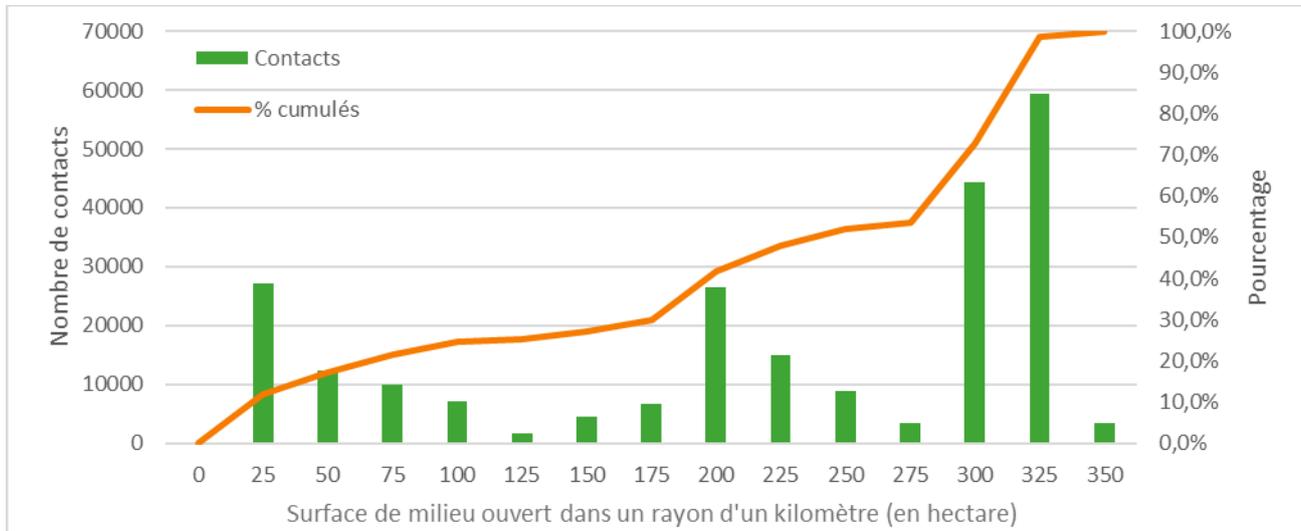


Figure 18 : Répartition des contacts de chiroptères en fonction de la surface de milieux ouverts dans un rayon d'un kilomètre

Les milieux ouverts ont également fait l'objet d'une analyse détaillée en fonction du type de milieu ouvert : culture et prairie. Le graphique suivant représente la répartition de l'activité des chiroptères en fonction de la surface totale des deux différents types de milieu ouvert détaillés ci-dessus dans un rayon d'un kilomètre autour des mâts de mesures. Les résultats observés apparaissent assez différents en fonction du type de milieu ouvert. La grande majorité des contacts de chiroptères se concentrent dans les faibles surfaces de cultures (95 % des contacts pour des surfaces de cultures inférieures à 125 ha). A l'inverse la majorité des contacts se concentrent dans les surfaces de prairies les plus élevées (95 % des contacts pour des surfaces de cultures inférieures à 275 ha).

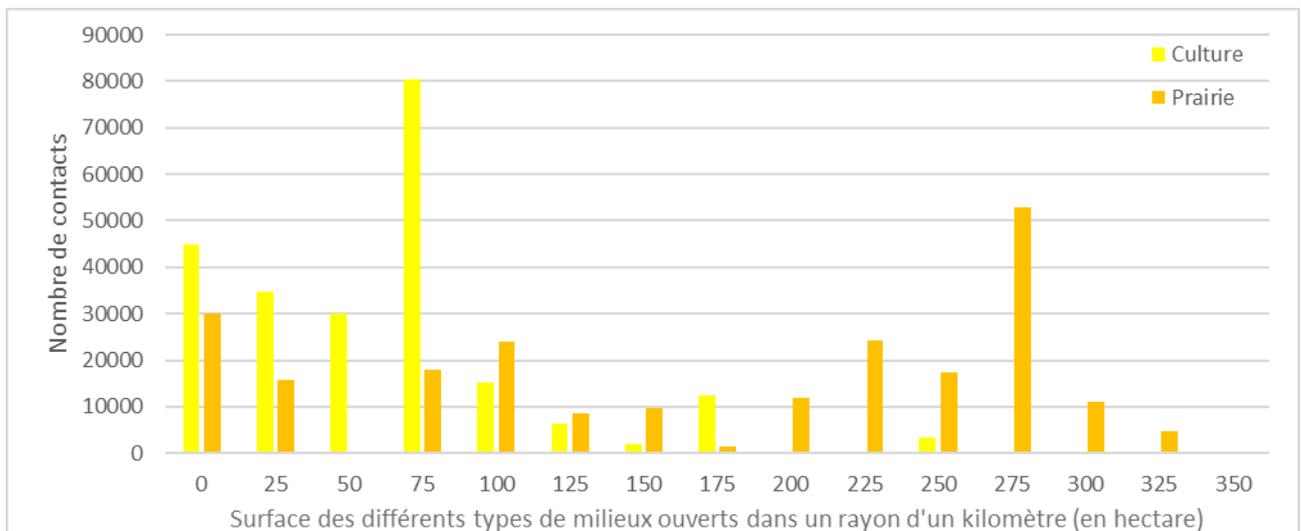


Figure 19 : Répartition des contacts de chiroptères en fonction de la surface du type de milieu ouvert dans un rayon d'un kilomètre

2.6. Analyse multivariée de l'influence des variables liées aux habitats naturels environnants sur l'activité des chiroptères

Afin d'observer au mieux le jeu de données, des ACP ont été réalisées sur l'ensemble des données. Le graphique suivant affiche les différentes variables sur deux dimensions (65 % explained variances). Ainsi, la majorité des variables apparaissent de façon très parlantes pour le jeu de données. Les variables liées aux différentes surfaces de boisements (Surf_Feuillu, Surf_Forêt, Surf_Conif, Surf_Mixte) sont fortement corrélées entre elles et très explicatives du jeu de données. Les variables de milieux ouverts (Surf_M_Ouvert, Surf_Prairie, Surf_Culture) et de proximité (Proxi_Foret, Proxi_Hydro, Proxi_Haie) sont également bien représentées. Les variables de longueur (Long_Haie, Long_Hydro) sont moins bien représentées par le cercle des corrélations. La variable de la vitesse de vent (Classe_V) est la moins bien représentée par ce cercle de corrélation. Enfin, hormis les variables de surfaces forestières entre elle, l'ensemble des variables apparaissent globalement indépendantes entre elles.

Les tests statistiques menés sur l'ensemble du jeu de données affichent une influence significative positive de la proximité des haies, de la longueur de haie, des surfaces de forêt (feuillu, conifère, mixte) et des milieux ouverts, une influence significative négative de la proximité des forêts, de la proximité du réseau hydrographique, de la surface de prairie, de la longueur des cours d'eau et de la surface de culture.

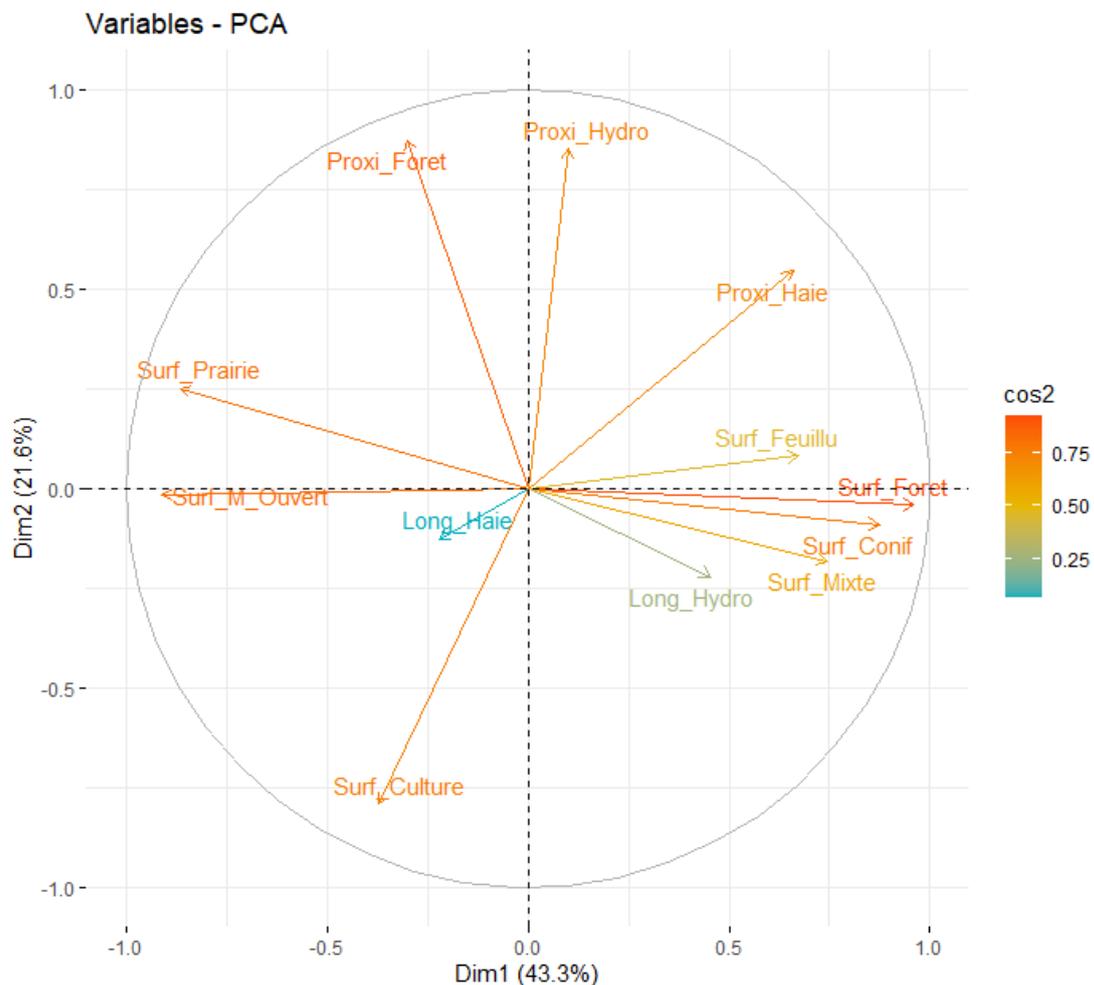
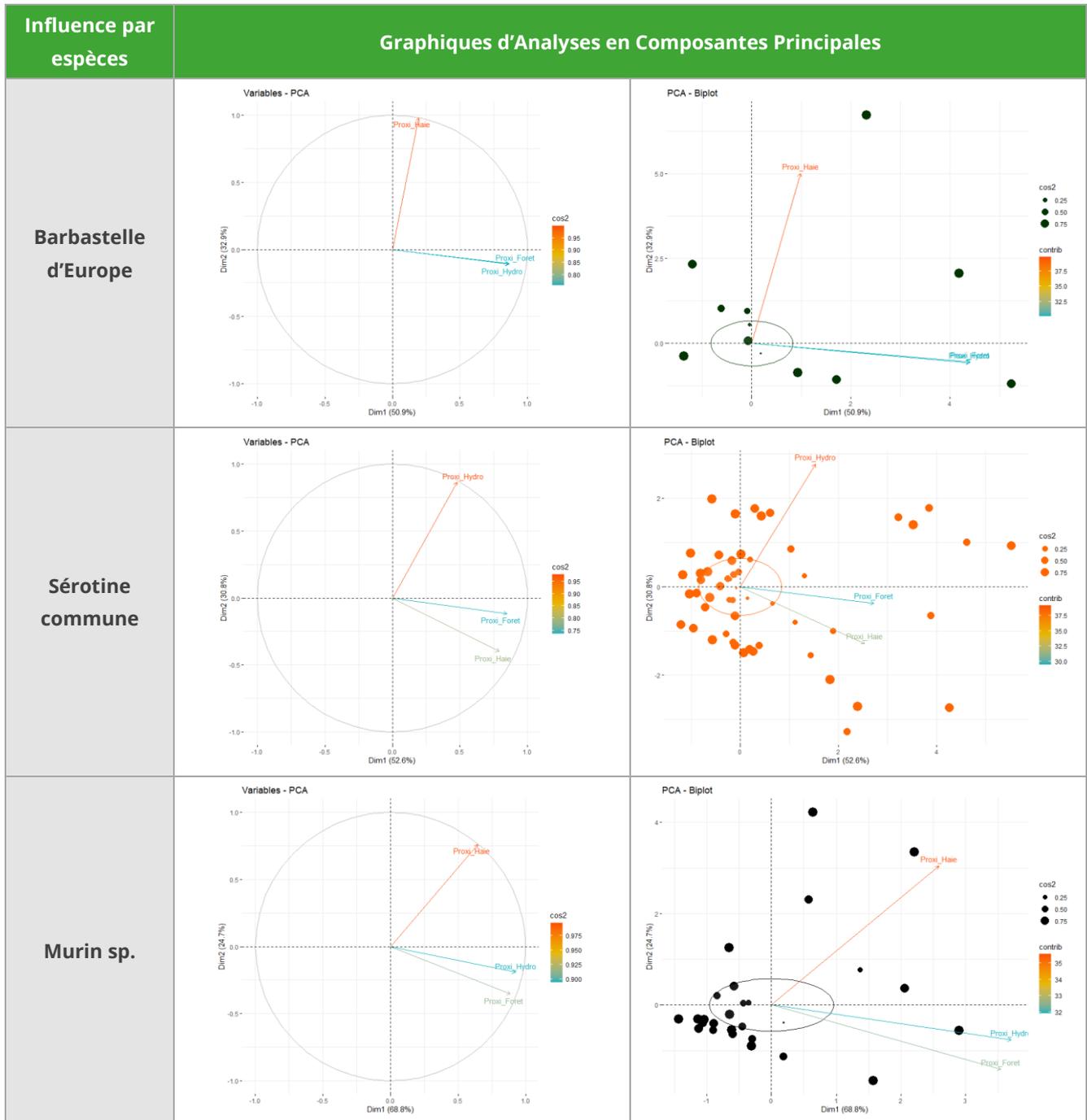


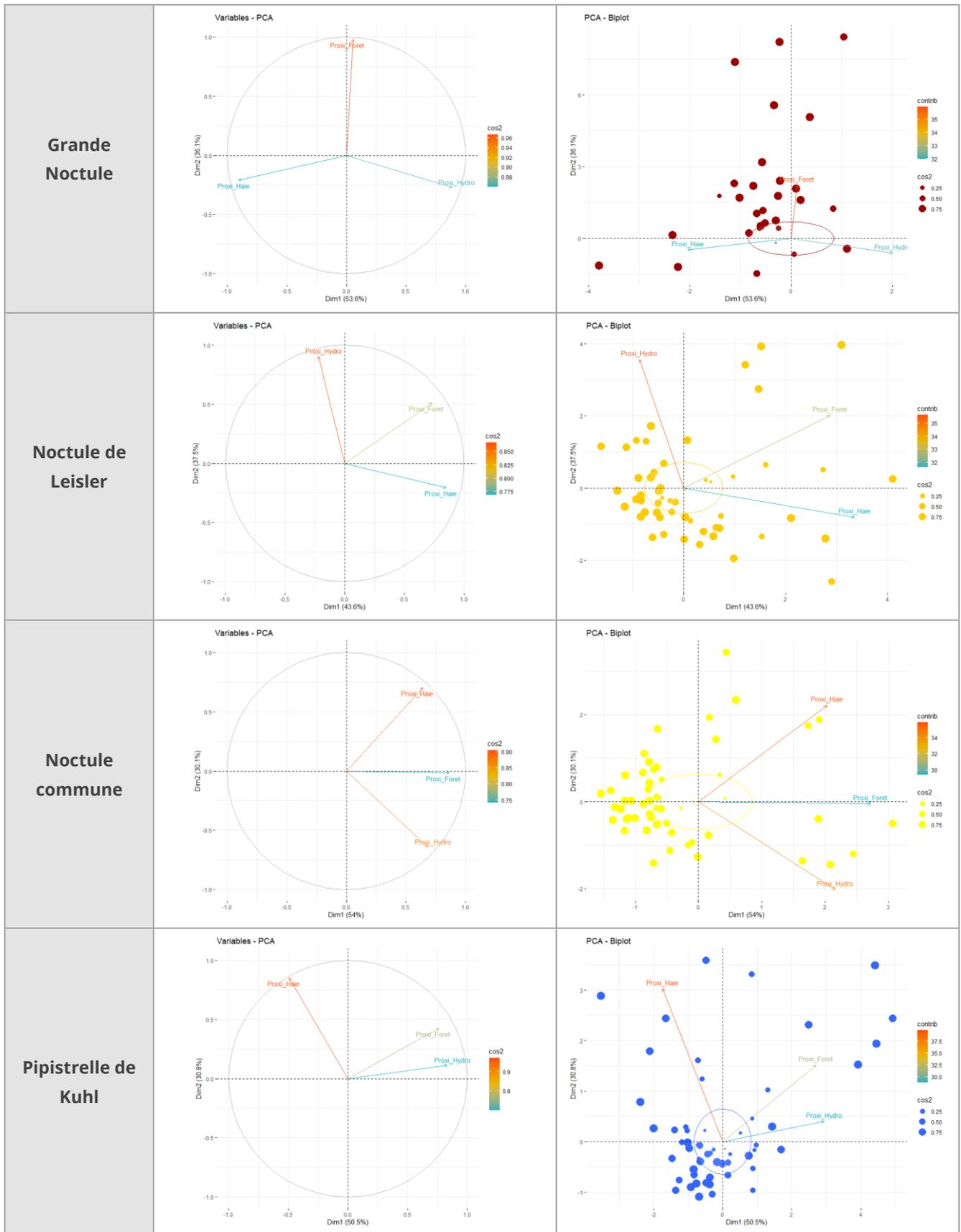
Figure 20 : Cercle de corrélation de l'analyse en composante principale (ACP) sur les variables liées aux habitats naturels environnants

2.6.1. Analyse de l'effet de la proximité d'habitats favorables

Lorsque l'on observe la répartition des contacts de chiroptères par espèces en fonction de ces différentes variables (graphiques suivants), il apparait que pour l'ensemble des espèces les variables sont très explicatives.

Pour la majorité des espèces la variable la plus explicative est la proximité à la haie notamment pour la Barbastelle d'Europe, le groupe des murins, la Noctule commune, la Pipistrelle de Kuhl, la Pipistrelle commune et le groupe des oreillardards. Pour les autres espèces, la variable la plus explicative est la proximité du réseau hydrographique pour la Sérotine commune et la Noctule de Leisler et la proximité des boisements pour la Grande Noctule et la Pipistrelle de Nathusius.





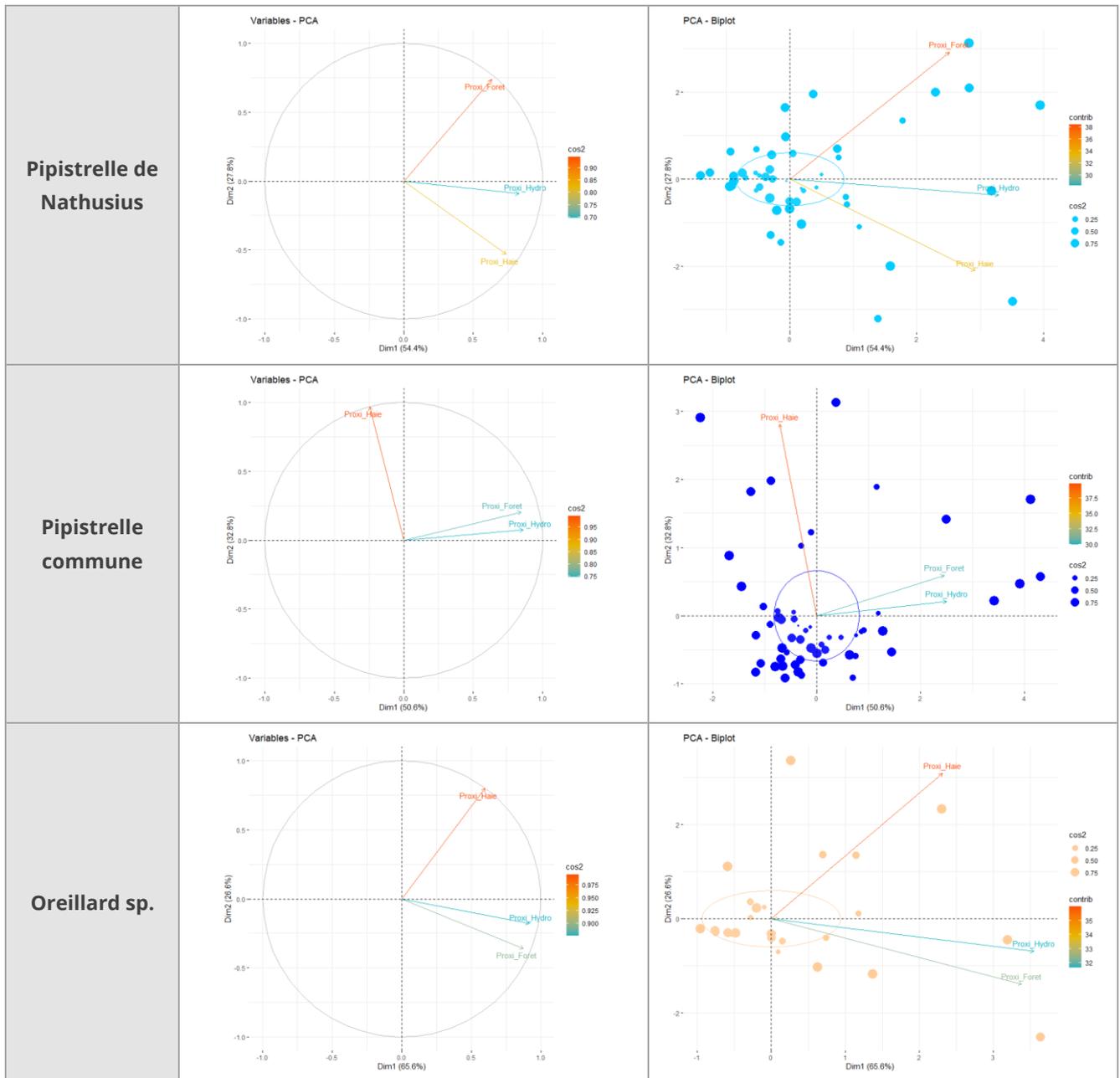


Figure 21 : ACP sur l'activité des chiroptères par espèces ou groupe d'espèces en fonction liées aux habitats naturels environnants

Le tableau suivant synthétise les résultats des tests statistiques menés sur les données présentées ci-dessus. La distance aux forêts semble exercer une influence significative négative sur la grande majorité des espèces. Seule la Pipistrelle de Nathusius montre une influence significative positive de la distance aux forêts.

La majorité des espèces affichent également une influence significative de la distance au réseau hydrographique. La Grande Noctule et la Noctule commune montrent cependant une influence significative positive de la distance au réseau hydrographique.

Enfin, les résultats sont plus partagés sur la distance aux haies avec une influence significative négative pour la Barbastelle d'Europe, la Sérotine commune, le groupe des murins, la Grande Noctule et la Pipistrelle de Kuhl et une influence significative positive pour la Noctule de Leisler, la Noctule commune, la Pipistrelle de Nathusius et la Pipistrelle commune.

Le résultat est non significatif pour la distance aux haies concernant le groupe des oreillards.

Espèce/Variable	Distance aux haies	Distance aux forêts	Distance au réseau hydrographique
Barbastelle d'Europe	Influence significative négative (p-value=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-value=0,006)	Influence significative négative (p-value=0,05)
Sérotine commune	Influence significative négative (p-value=0,006)	Influence significative négative (p-value=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-value=2,2 ^{e-13})
Murin sp.	Influence significative négative (p-value=8,7 ^{e-8})	Influence significative négative (p-value=0,0001)	Influence significative négative (p-value=0,001)
Grande Noctule	Influence significative négative (p-value=0,01)	Influence significative négative (p-value=2,2 ^{e-16})	Influence significative positive (p-value=2,2 ^{e-16})
Noctule de Leisler	Influence significative positive (p-value=3,1 ^{e-16})	Influence significative négative (p-value=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-value=2,2 ^{e-16})
Noctule commune	Influence significative positive (p-value=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-value=2,2 ^{e-16})	Influence significative positive (p-value=2,2 ^{e-16})
Pipistrelle de Kuhl	Influence significative négative (p-value=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-value=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-value=2,2 ^{e-16})
Pipistrelle de Nathusius	Influence significative positive (p-value=3,1 ^{e-11})	Influence significative positive (p-value=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-value=2,2 ^{e-16})
Pipistrelle commune	Influence significative positive (p-value=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-value=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-value=2,2 ^{e-16})
Oreillard sp	Influence non significative	Influence significative négative (p-value=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-value=3,2 ^{e-14})

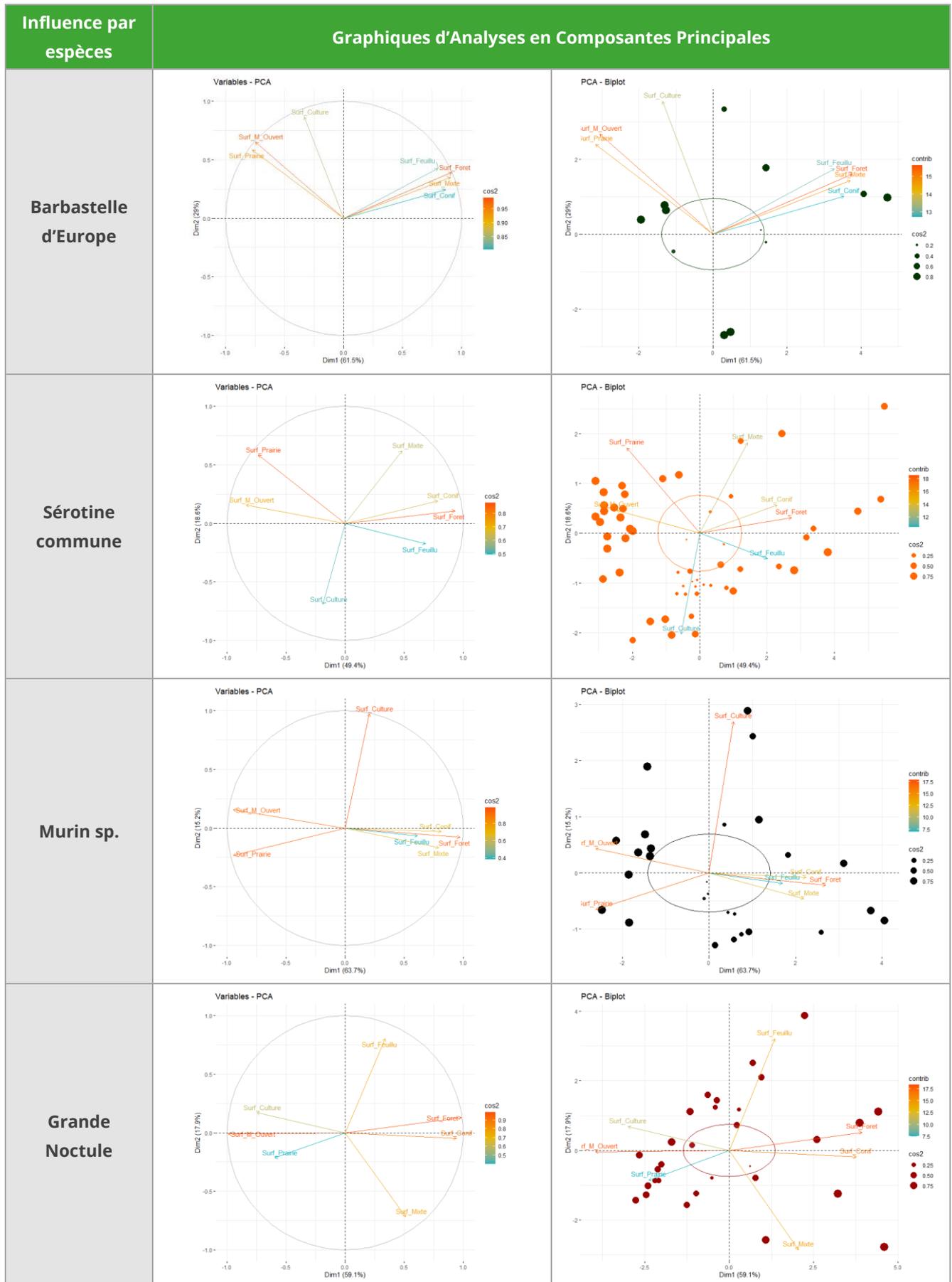
Tableau 3 : Résultats des tests statistiques par espèce ou groupe d'espèces en fonction des variables liées à la proximité d'habitats favorables

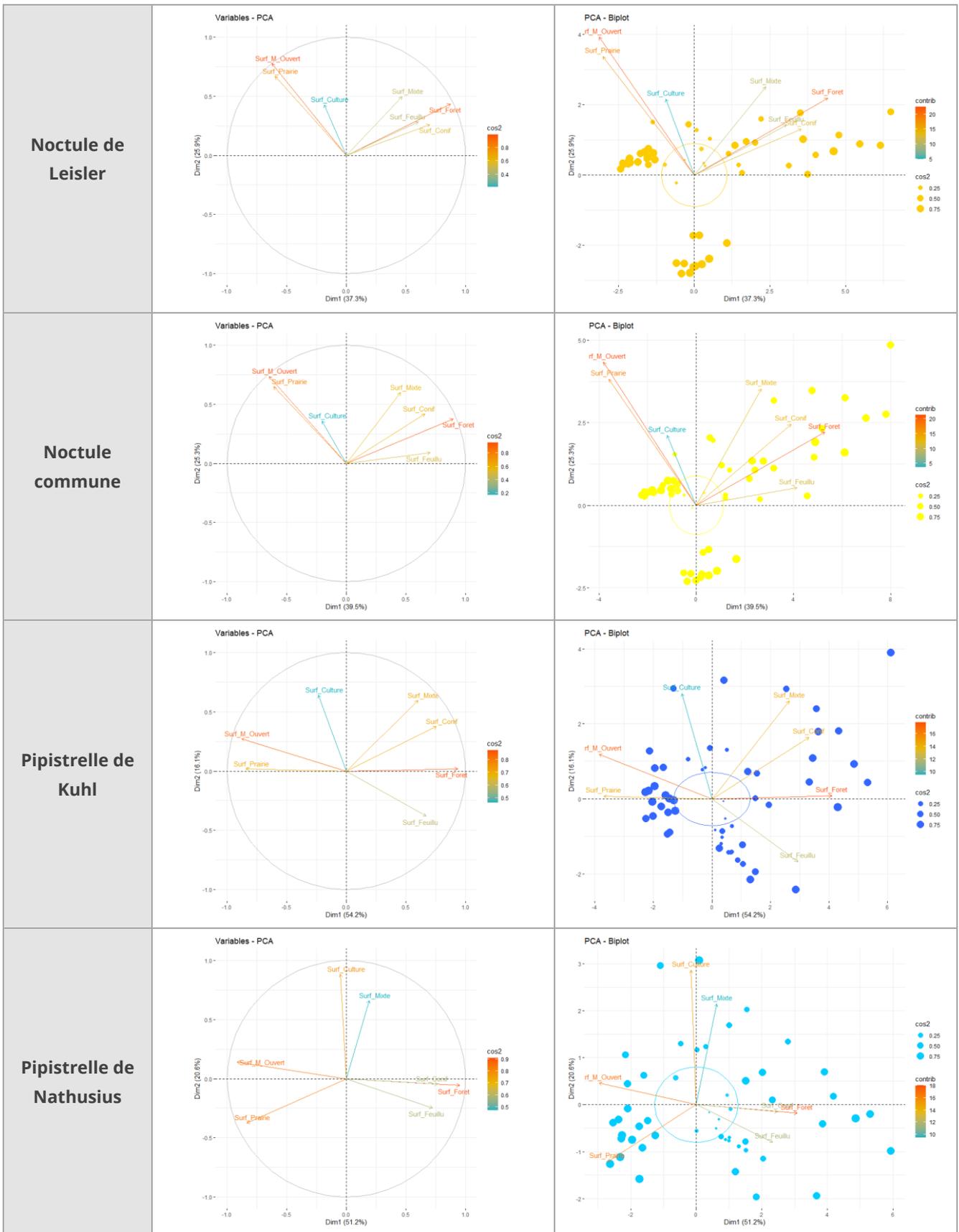
2.6.2. Analyse de l'effet de la proportion d'habitats naturels environnants

Lorsque l'on observe la répartition des contacts de chiroptères par espèces en fonction de ces différentes variables (graphiques suivants), il apparaît que pour l'ensemble des espèces les variables sont très explicatives.



Pour l'ensemble des espèces, les variables les plus explicatives sont la surface de forêt et la surface de milieux ouverts.





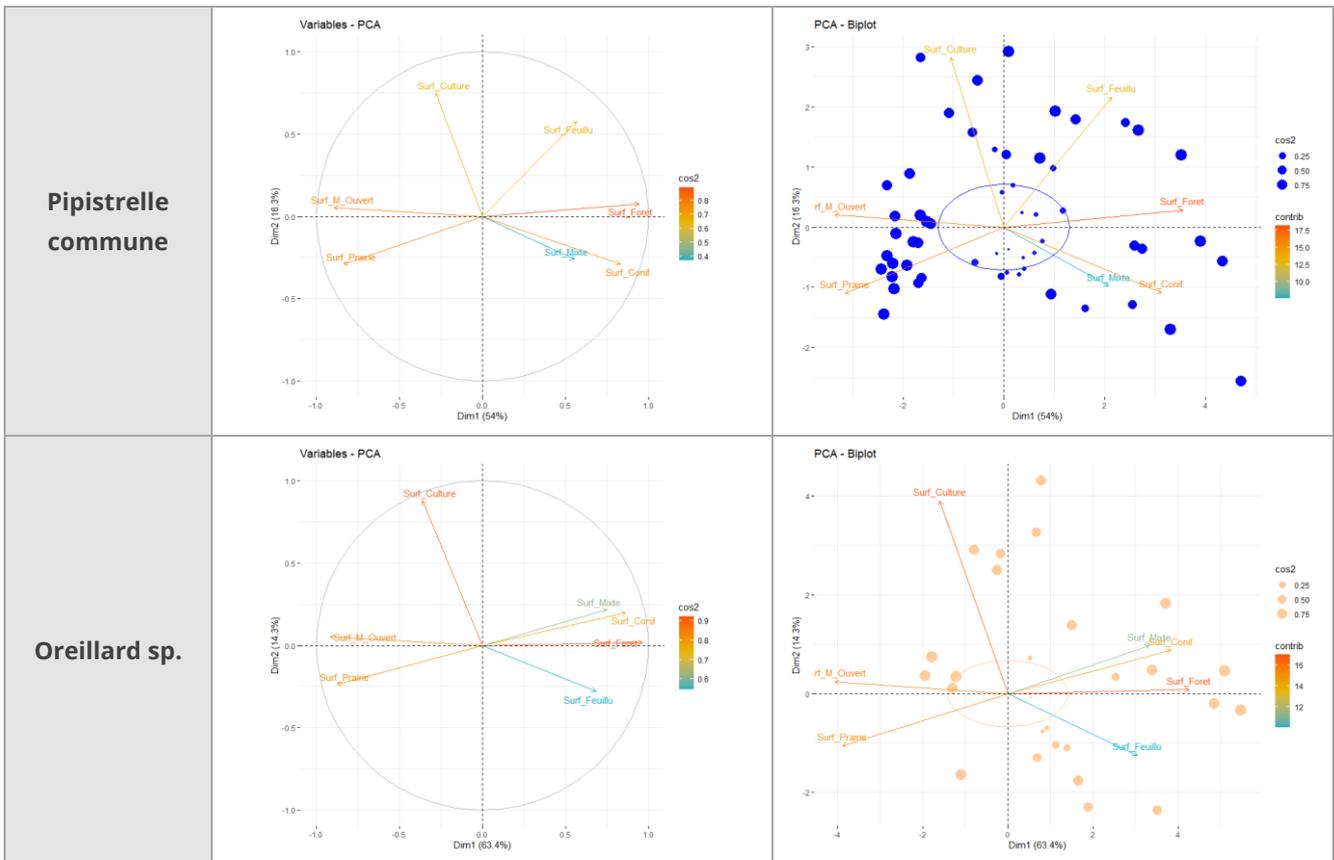


Figure 22 : ACP sur l'activité des chiroptères par espèces ou groupe d'espèces en fonction des variables liées à la proportion d'habitats naturels environnants

Le tableau suivant synthétise les résultats des tests statistiques menés sur les données présentées ci-dessus.

La surface de forêt a une influence significative positive sur la majorité des espèces à savoir la Barbastelle d'Europe, la Sérotine commune, le groupe des murins, la Noctule de Leisler, la Pipistrelle de Kuhl, la Pipistrelle de Nathusius, la Pipistrelle commune et le groupe des oreillards. Cette influence est à l'inverse significative négative pour la Grande Noctule et la Noctule commune. Ces résultats sont globalement similaires quelques soit le type de boisement (feuillu, conifère et mixte). Parmi les différences identifiées, la surface de conifère a une influence significative négative pour la Sérotine commune et la Noctule de Leisler, la surface de boisement mixte a une influence négative sur la Barbastelle d'Europe, la Pipistrelle de Kuhl et le groupe des oreillards et une influence positive sur la Noctule commune. Les résultats sont non significatifs pour la surface de feuillu concernant la Barbastelle d'Europe et la surface de boisement mixte pour le groupe des murins.

Parallèlement, la surface de milieu ouvert a une influence significative positive sur la majorité des espèces à savoir la Barbastelle d'Europe, la Noctule de Leisler, la Noctule commune, la Pipistrelle de Kuhl, la Pipistrelle de Nathusius et la Pipistrelle commune. A l'inverse l'influence de la surface de milieu ouvert est significative négative pour la Sérotine commune. Si l'on regarde dans le détail l'influence des surfaces de prairies et de cultures, les résultats sont assez différents. La surface de prairie a une influence significative négative sur la majorité des espèces (Barbastelle d'Europe, Noctule de Leisler, Noctule commune, Pipistrelle de Kuhl et Pipistrelle commune). L'influence de la surface de prairie est à l'inverse significative positive pour la Sérotine commune. La surface de culture a une influence significative négative pour la majorité des espèces (Sérotine



commune, Noctule de Leisler, Noctule commune, Pipistrelle de Kuhl et Pipistrelle commune). L'influence de la surface de culture est à l'inverse significative positive pour la Barbastelle d'Europe.

Les résultats sont non significatifs pour la surface de milieu ouvert pour le groupe des murins et la Grande Noctule et pour les surfaces de prairie et de culture concernant le groupe des murins, la Grande Noctule, la Pipistrelle de Nathusius et le groupe des oreillards. Concernant la Barbastelle d'Europe, la surface de feuillu montre un résultat non significatif.

Espèce	Surface Forêt	Surface Feuillu	Surface Conifère	Surface Mixte	Surface Milieu ouvert	Surface Prairie	Surface Culture
Barbastelle d'Europe	Influence significative positive (p-v=0,002)	Influence non significative	Influence significative positive (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-v=0,002)	Influence significative positive (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative positive (p-v=2,2 ^{e-16})
Sérotine commune	Influence significative positive (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative positive (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative positive (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-v=3,6 ^{e-14})	Influence significative positive (p-v=2,4 ^{e-15})	Influence significative négative (p-v=2,4 ^{e-14})
Murin sp.	Influence significative positive (p-v=2,1 ^{e-8})	Influence significative positive (p-v=3,1 ^{e-8})	Influence significative positive (p-v=1,7 ^{e-8})	Influence non significative	Influence non significative	Influence non significative	Influence non significative
Grande Noctule	Influence significative négative (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-v=0,0001)	Influence significative négative (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence non significative	Influence non significative	Influence non significative
Noctule de Leisler	Influence significative positive (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative positive (p-v=0,001)	Influence significative négative (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative positive (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative positive (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-v=2,2 ^{e-16})
Noctule commune	Influence significative négative (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative positive (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative positive (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-v=2,2 ^{e-16})
Pipistrelle de Kuhl	Influence significative positive (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative positive (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative positive (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative positive (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative négative (p-v=2,2 ^{e-16})
Pipistrelle de Nathusius	Influence significative positive (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative positive (p-v=0,01)	Influence non significative	Influence non significative			



Pipistrelle commune	Influence significative positive (p-v=2,2 ^{e-16})	Influence significative positive (p-v=7,8 ^{e-8})	Influence significative négative (p-v=0,04)	Influence significative négative (p-v=2,1 ^{e-06})			
Oreillard sp	Influence significative positive (p-v=0,002)	Influence significative positive (p-v=0,004)	Influence significative positive (p-v=0,0001)	Influence significative négative (p-v=1,4 ^{e-6})	Influence non significative	Influence non significative	Influence non significative

Tableau 4 : Résultats des tests statistiques par espèce ou groupe d'espèces en fonction des variables liées à la proportion d'habitats naturels environnants

3. Conclusion et discussion

Ce grand jeu de données de 60 sites d'enregistrements des chauves-souris en altitude dans le grand centre ouest de la France a permis d'éclairer encore sur les corrélations entre les chiroptères et :

- les conditions météorologiques
- le cycle circadien
- et le paysage environnant

Notamment, ces connaissances peuvent être utiles dans le cadre de l'analyse des impacts potentiels d'un parc éolien, afin d'en prévenir les conséquences sur la mortalité des chauves-souris. En effet, les écoutes, menées sur mâts de mesures dans un contexte similaires à celles qui pourraient être menées sur les nacelles d'éoliennes une fois les parcs éoliens implantés, permettent une comparaison avec différentes études menées dans le cadre de parcs éoliens.

3.1. Analyse de l'influence des variables périodiques et temporelles sur l'activité des chiroptères

L'activité des chiroptères est ainsi liée à plusieurs variables bien différentes (période, vent, température et horaire). Bien qu'indépendantes les unes des autres, ces quatre variables influencent significativement la présence des chiroptères. Ainsi, ces quatre facteurs permettent de définir des plages d'activités préférentielles qui doivent être affinées selon chaque site. Les chiroptères semblent en effet s'adapter aux conditions locales et disponibles pour pouvoir se nourrir. Il reste alors indispensable d'étudier leur activité en prenant en compte les facteurs environnementaux l'influençant de manière croisée plutôt qu'isolée. En effet, les chiroptères se déplacent dans des conditions favorables comme le début de la nuit, une température élevée, avec des vitesses de vent assez faibles.

Dans un premier temps **la phase biologique** joue un rôle important. Les chiroptères possèdent un cycle biologique présentant une phase d'hibernation de novembre à février, une phase de migration printanière vers les gîtes estivaux de mars à mai, une phase de mise-bas au sein de ces gîtes de juin à juillet-août, une période de migration vers les secteurs de swarming (accouplements) et vers les gîtes hivernaux d'août à octobre. Sur l'ensemble de ces saisons, hormis l'hibernation, des cas de mortalité liés aux éoliennes sur des populations



locales ou migratrices sont observés (Brinkmann *et al.* 2011, Voigt *et al.* 2012, Lloyd *et al.* 2023). Les résultats de la présente étude sur les grandes phases du cycle biologique des chiroptères exposent un gradient d'activité. L'activité en phase de transits printaniers et gestation représente en effet 28 % des contacts enregistrés ; en phase de mise-bas et élevages des jeunes, elle affiche 31 %, et en période de transits automnaux, elle cumule 40 % des contacts de chiroptères. Cette période apparaît ainsi comme cruciale dans l'activité en hauteur des chauves-souris. Selon une étude réalisée en Allemagne (Dürr 2003), sur 82 chauves-souris mortes par collision avec des éoliennes, seuls 8,5 % des cadavres ont été trouvés lors des migrations de printemps et en période de mise-bas et d'élevage des jeunes. La majorité des cadavres a été découverte lors de la dispersion des colonies de reproduction, de la fréquentation des gîtes de transit et d'accouplement et de la migration automnale. Cela peut s'expliquer par le fait que la migration automnale a généralement lieu sur une période plus étalée que la migration printanière en raison des nombreuses pauses destinées à se réapprovisionner et à s'accoupler. Furmankiewicz et Kucharska (2009) soulignent d'ailleurs un retour rapide aux gîtes estivaux après la phase d'hibernation. Selon ces auteurs, une autre raison pourrait être que la hauteur de vol des chiroptères en migration serait inférieure en automne par rapport au printemps. Enfin, un fait intéressant à noter est la répartition spatiale des mortalités constatées sur certains parcs éoliens. Baerwald et Barclay (2011) ont ainsi mesuré des taux de mortalité supérieurs au nord des parcs, ce qui suggère que les aérogénérateurs au nord seraient les premiers rencontrés par les espèces migratrices en automne selon un axe nord-est/sud-ouest.

Les résultats obtenus sur la répartition mensuelle des contacts de chauves-souris enregistrés affichent un gradient d'activité atteignant un maximum lors des mois d'août et de septembre. Ces mois sont également cités par Dulac *et al.* 2008 et Niermann *et al.* 2011 comme les mois présentant le plus de mortalité chiroptérologique dans le cadre de suivis de parcs éoliens. Le mois d'août est également relevé par Beucher *et al.* en 2013 comme une période de mortalité marquée sur le parc éolien de Castelnau. Enfin, Dubourg-Savage *et al.* illustrent en 2009 la mortalité des chiroptères en fonction du mois en Allemagne. Cet article affichait un regroupement de la mortalité chiroptérologique de fin-juillet à début-octobre avec les maximas observés en août et septembre, ce qui confirme les résultats de la répartition de l'activité des chauves-souris obtenus dans cette étude.

Enfin, les résultats affichent une forte variabilité inter-journalière de l'activité des chiroptères pouvant être reliée à différents facteurs comme l'émergence d'insectes, des conditions favorables aux déplacements et migrations d'individus, à l'émancipation des jeunes, etc. Cette variabilité reste très complexe à anticiper et les facteurs l'influençant également.

La mise en place de mesures pour la protection des chiroptères par périodicité mensuelle apparaît ainsi comme la meilleure solution.

Dans un second temps, **l'influence des conditions météorologiques** (vent et température) sur le nombre de contacts chiroptérologiques est assez controversée. Les données utilisées dans cet article montrent une influence significative de ces deux variables météorologiques sur la répartition des contacts de chiroptères. Les résultats obtenus illustrent une concentration des contacts de chiroptères en dessous de 5,5 m/s et au-delà de 15 °C ; soit des vitesses de vent plutôt faibles et des températures plutôt élevées. Ces résultats ont été cités dans plusieurs publications à l'exemple de Horn *et al.* 2008, Silva 2009, Behr *et al.* 2011, Brinkmann *et al.* 2011, Amorim *et al.* 2012 ou encore Limpens *et al.* 2013. Cependant, il existe des variabilités d'adaptation aux conditions météorologiques en fonction des espèces (Dürr 2007, Seiche *et al.* 2007, Arnett *et al.* 2011 & 2013a), des sites (Arnett *et al.* 2008, Rydell *et al.* 2010a, Limpens *et al.* 2013), des régions (Dubourg-Savage *et al.* 2011, Niermann



et al. 2011, Georgiakakis *et al.* 2012) et des années (Bach et Niermann 2011 & 2013, Limpens *et al.* 2013). Ces variations inter-spécifiques, inter-sites, inter-regionales et inter-annuelles complexifient la compréhension des variables influençant l'activité des chauves-souris mais valident aussi une adaptation aux conditions disponibles comme l'illustrent les comportements des chiroptères volant à des conditions moins favorables en cas de non-disponibilité des conditions préférentielles des espèces.

La vitesse du vent est un facteur qui influence à la fois négativement l'activité chiroptérologique, et positivement la production d'électricité par les parcs éoliens. Plusieurs études ont analysé cette variable. Rydell *et al.* (2010) ont noté des activités maximales pour une vitesse de vent entre 0 et 2 m/s puis, de 2 à 8 m/s, une activité diminuant pour devenir inexistante au-delà de 8 m/s. Behr *et al.* (2007) arrivèrent aux mêmes conclusions pour des vitesses de vent supérieures à 6,5 m/s. Si la plupart des études sur le sujet concordent sur ce phénomène, les valeurs seuils sont variables et dépendantes de la localisation des sites, de la période de l'année, des espèces concernées. Arnett *et al.* (2008) estimèrent pour deux parcs éoliens des États-Unis que la mortalité aurait été réduite de 85 % si les aérogénérateurs avaient été arrêtés pour des valeurs de vent inférieures à 6 m/s en fin d'été-début d'automne. En 2018, Welling *et al.* ont étudié l'activité des chiroptères en fonction de la vitesse de vent et de la hauteur d'enregistrement, démontrant une décroissance forte de l'activité des chauves-souris au-delà de 50 m entre 2 m/s et 5 m/s. Ce résultat corrobore le résultat obtenu dans la présente étude démontrant une valeur charnière pour l'activité des chauves-souris à 5,5 m/s. Des variabilités semblent cependant exister entre l'activité et la mortalité des chiroptères. Une étude menée par Rico et Lagrange en 2016 démontre en effet une activité chiroptérologique majoritairement concentrée entre 0 m/s et 3,5 m/s et en parallèle une mortalité groupée entre 4,5 m/s et 6,5 m/s. Il apparaît ainsi nécessaire d'étudier simultanément l'activité des chiroptères en hauteur et la mortalité observée au sol pour comprendre au mieux les différents phénomènes pouvant influencer sur le risque de mortalité des chauves-souris dans le contexte éolien.

Parallèlement, la température joue un rôle dans l'activité chiroptérologique même si certaines espèces, plus robustes, semblent enclines à s'en affranchir en cas de températures fraîches sur une longue période. Si plusieurs auteurs concluent à une corrélation positive entre augmentation de la température et activité (Redell *et al.* 2006 ; Arnett *et al.* 2006, 2007 ; Baerwald and Barclay 2011, etc.), d'autres ne considèrent pas ce paramètre en tant que facteur influant indépendamment sur l'activité chiroptérologique (Horn *et al.* 2008 ; Kerns *et al.* 2005). Arnett *et al.* 2006 ont en outre observé qu'au-dessus de 44 m d'altitude, l'activité n'était en rien affectée par la température. Cependant, à l'instar de Martin *et al.* ; en 2017, plusieurs auteurs s'accordent sur l'importance de la prise en compte de la température pour la mise en place de mesure de réduction du risque de mortalité des chiroptères dans le contexte éolien. Martin *et al.* (2017) préconisent notamment un seuil de 9,5 °C pour les saisons fraîches (début du printemps et automne). Les résultats de la présente étude valident l'influence de la température sur l'activité chiroptérologique et ainsi l'intérêt de la prise en compte de cette variable pour la mise en place de mesure pour la préservation des chiroptères dans le cadre des études de projets de parcs éoliens.

Les résultats de répartition des contacts chiroptérologiques en fonction du **cycle circadien** permettent d'avoir une vision sur l'activité chiroptérologique au cours de la nuit. Les résultats de la présente étude démontrent que l'activité chiroptérologique se concentre significativement dans les 3 à 4 premières heures suivant le coucher du soleil. Ce phénomène de concentration de l'activité des chiroptères en début de nuit est également validé par de nombreux auteurs comme Wellig *et al.* (2018) qui montre clairement un maximum des chiroptères en début de nuit, ou encore Heitz & Jung (2016) qui compile un grand nombre de suivis d'activité des chiroptères montrant



qu'une majorité des espèces présentent une phénologie marquée avec un maximum d'activité dans les premières heures de la nuit (2 à 4 premières heures de la nuit selon les études).

Si l'on examine l'évolution de l'activité chiroptérologique au cours des heures de la nuit, plusieurs périodes semblent se dessiner. Dans un premier temps, une activité concentrée uniquement en début de nuit jusqu'au mois de mai. Ce regroupement d'activité est certainement corrélé à l'accessibilité aux insectes avec une biomasse plus importante en début de nuit (Erkert 1982, Barclay 1991). Dans un second temps, de mai à août, l'activité apparaît plus marquée et s'étend de plus en plus au cours de la nuit. Cette périodicité correspond à l'installation des colonies dans leurs gîtes estivaux avant la mise-bas (Dietz *et al.* 2009, Kapfer & Aron 2007) et aux phases intenses de nourrissage des adultes afin de subvenir aux besoins de leurs petits. Au début du mois d'août, l'activité s'étale de plus en plus au cours de la nuit et pourrait souligner un besoin de nourrissage important pouvant être lié à l'émancipation des jeunes et à leur apprentissage. Il a été mis en évidence que lors des premières phases de chasse des jeunes, ces derniers restent à proximité de leur gîte augmentant ainsi le nombre de chauves-souris sur les territoires de chasse (Dietz *et al.* 2009). La dernière période observée est celle allant de mi-août à fin septembre qui affiche une activité répartie tout au long de la nuit appuyée par un regain d'activité quelques heures avant le lever du soleil. Cette activité remarquable pourrait être reliée à la dispersion des colonies, aux périodes de swarming (Hutterer 2005, Bauer 1960) et aux phases plus intenses de chasse pour préparer les réserves hivernales de graisse (Dietz *et al.* 2009). Le swarming est une période où les chauves-souris réalisent de multiples allers-retours au cours de la nuit entre différentes cavités ainsi que des vols de poursuites et des comportements sociaux (Dietz *et al.* 2009, Bauer 1960). De plus, plusieurs références bibliographiques corroborent les comportements de vols en altitude lors des déplacements de longues distances comme les migrations. En effet, Cryan *et al.* 2014 montrent des vols en altitude avec des comportements de déplacements à vue et l'utilisation des courants d'air. Johnson *et al.* 2003 et Erickson *et al.* 2011 démontrent des émissions sonars réduites en migration ce qui valide des couloirs de vol en milieux dégagés, soit en plein ciel (Holzhaider *et al.* 2001, Aulagnier *et al.* 2005). La présence d'activités plus marquées du milieu à la fin de la nuit pourrait également être reliée à des déplacements plus tardifs dans la nuit, notamment chez la Pipistrelle de Nathusius, comme semble le montrer des prémisses de résultats en ce sens de Le Campion & Dubos 2017. Enfin, l'activité observée diminue progressivement au cours de la nuit dans le courant du mois d'octobre qui correspond, en fonction des températures, à l'entrée des chiroptères en léthargie aux environs du mois de novembre.

Plusieurs publications mettent également en évidence des répartitions de l'activité au cours de la nuit variables en fonction des espèces présentes. Ainsi, Mariton *et al.* en 2023 présentent plusieurs catégories : des groupes d'espèces crépusculaires avec un pic en début de nuit et un en fin de nuit qui pourraient être en lien avec le nourrissage de diptères (Ware et coll. 2020) (Pipistrelle commune, Pipistrelle pygmée, Noctule commune) ; des groupes d'espèces avec une activité tardive en début de nuit et précoce en fin de nuit qui pourraient être en lien avec le nourrissage de lépidoptères (Ware et coll. 2020) (Grand Murin, Oreillard roux, Murin à oreilles échancrées, Murin de Natterer, Oreillard gris, Molosse de Cestoni, Petit Rhinolophe, Barbastelle d'Europe, Minoptères de Schreibers) ; des groupes d'espèces médianes avec une activité intermédiaire entre le début et la fin de nuit qui pourrait également être en lien avec le nourrissage de diptères (Ware et coll. 2020) (Pipistrelle de Kuhl, Vespère de Savi, Murin de Daubenton, Sérotine commune, Noctule de Leisler et Grand Rhinolophe). Les résultats observés dans cette étude viennent corroborer la variabilité de la répartition de l'activité des chiroptères au cours de la nuit en fonction des espèces et des groupes d'espèces.



Plusieurs variables complémentaires pourraient être prises en compte afin d'affiner les conditions semblant caractériser l'activité chiroptérologique. Les conditions météorologiques influent en effet directement ou indirectement sur la disponibilité en ressource alimentaire (insectes majoritairement pour les chauves-souris européennes) et sur les conditions de vol des chiroptères (Baerwald and Barclay 2011). Il serait ainsi intéressant de travailler sur les variables conditionnant l'émergence et la présence d'insectes. La pluviométrie est à l'inverse assez bien documentée à l'heure actuelle. Il est en effet acquis que la pluie diminue fortement voire stoppe l'activité des chauves-souris (Brinkmann *et al.*, 2011). Les opinions sur les autres paramètres météorologiques sont plus mitigées. La pression atmosphérique (Cryan and Brown 2007 ; Kern *et al.* 2005), le rayonnement lunaire (Baerwald and Barclay 2011 ; Cryan *et al.* 2014, Mariton *et al.* 2022) et l'hygrométrie (Behr *et al.* 2011) pourraient également influencer sur l'activité chiroptérologique. Il semble toutefois plus vraisemblable que ces paramètres influent de manière concomitante sur l'activité des chiroptères (comme le montrent Behr *et al.* (2011)), ou sur l'abondance d'insectes (Corten and Veldkamp 2001). Il serait également intéressant de travailler sur la variable de la direction du vent qui pourrait directement influencer les déplacements des chiroptères et potentiellement expliquer les mouvements migratoires et ainsi la forte activité et mortalité des chiroptères dans le contexte éolien qui sont remarquables lors des transits automnaux et swarming (août, septembre et octobre).

Ces variables analysées indépendamment ne permettent pas d'expliquer la complexité de l'activité des chiroptères. En effet, ceci peut s'observer par exemple avec la présence d'une activité chiroptérologique faible en début de nuit alors qu'il est connu que cette période est très favorable à l'activité chiroptérologique ; cependant si toutes les variables sont analysées, ce début de nuit présente des températures très faibles et des vitesses de vent élevées, qui une fois combinées expliquent la faible activité des chauves-souris.

Les variables d'horaires, de vents et de températures ne sont certainement pas les seules qui puissent influencer l'activité des chiroptères mais elles permettent de mieux appréhender la présence de chiroptères en hauteur. La prise en compte d'un maximum de variables influençant l'activité chiroptérologique permet de mieux anticiper l'activité des chiroptères et ainsi de les sauvegarder dans le contexte éolien par la mise en place de mesures d'arrêts programmés des éoliennes en adéquation avec les contextes locaux.

3.2. Analyse de l'influence des variables liées aux habitats naturels environnants

Les habitats présents à proximité des éoliennes influencent les cas de mortalité des chauves-souris. Rydell *et al.* en 2010 observent une mortalité de 0 à 3 chiroptères/éolienne/an en openfield, de 2 à 5 chiroptères/éolienne/an en milieu plus hétérogène, et de 5 à 20 chiroptères/éolienne/an sur la côte et en forêt (surtout sur les promontoires et crêtes). Ces résultats sont confirmés par plusieurs études.

La proximité et la proportion d'habitats naturels environnants influencent l'activité des chiroptères et ainsi le risque de mortalité.



L'implantation d'éoliennes à **proximité de plans d'eau, de cours d'eau ou des côtes** de ces habitats représente un fort risque de mortalité sur les chiroptères en raison de l'abondance d'insectes (Ahlen *et al.* 2003, Eurobats 2016). La présente étude confirme une influence significative sur l'activité des chiroptères qui est plus élevée pour la majorité des espèces lorsque la proximité avec les cours d'eau ou plan d'eau est réduite.

Concernant **les secteurs boisés**, une activité chiroptérologique plus élevée est observée, avec une influence significative de la distance aux boisements sur la densité d'espèces de bas et moyen vol (Pipistrelle commune, Pipistrelle de Kuhl, Sérotine commune) mais les espèces de haut-vol ne semblent pas répondre à cette variable (Pipistrelle de Nathusius, Noctule commune, Noctule de Leisler) (Roemer *et al.* 2019). Mathews *et al.* en 2012 montrent également que la présence de bois dans un rayon de 1 500 m des parcs éoliens semble réduire le risque pour les pipistrelles suivant les lisières mais augmente le risque pour les noctules. La présente étude confirme une influence significative sur l'activité des chiroptères qui est plus élevée pour la grande majorité des espèces lorsque la proximité avec les boisements est réduite. La surface de boisements dans un rayon d'un kilomètre autour des mâts de mesures où les écoutes ont été menées affichent également un effet significatif positif pour la majorité des espèces.

Les haies (à l'instar des lisières boisées) sont très importantes pour les chiroptères en fonction de leurs qualités et concentrent l'activité (Lacoeuilhe *et al.* 2018, Lacoeuilhe *et al.* 2016, Kelm *et al.* 2014, Boughey *et al.* 2011). Selon des études réalisées en Allemagne (Dürr 2003), plus la distance entre le mât de l'éolienne et les structures arborées avoisinantes (haies, lisières forestières) est faible et plus les cas de mortalité sont fréquents. Ainsi, plusieurs articles scientifiques et doctrines, à différentes échelles, recommandent une distance entre le bout de pale des éoliennes et les canopées des haies et boisements de 50 m (Dürr 2007, Kelm *et al.* 2014, Natural England 2014) jusqu'à 200 m (Eurobats 2017, SFPEM 2016). Ainsi, l'étude de Kelm *et al.* en 2014 présente une activité chiroptérologique concentrée dans les 50 premiers mètres à la haie (85 % des contacts enregistrés), qui devient anecdotique à partir de 200 m, ainsi que des espèces plus proches des haies (murins sp., Pipistrelle commune, Barbastelle d'Europe, Sérotine commune) que d'autres (Noctule commune, Pipistrelle de Nathusius). Barré *et al.* en 2022 relève qu'à titre d'exemple les recommandations Eurobats ne sont pas respectées et les tendances d'implantation des parcs éoliens ne tendent même pas vers un éloignement de la haie avec 89% des éoliennes du nord-ouest de la France à moins de 200 m des haies. Enfin, Leroux *et al.* en 2023 stipule que sans éoliennes une diminution de l'activité de tous les groupes d'espèces en fonction de la distance à la haie est observable et que l'implantation d'éoliennes modifie ces résultats. Les résultats obtenus dans la présente étude valident un effet significatif négatif de l'éloignement à la haie sur l'activité chiroptérologique pour plusieurs espèces. Certaines espèces apparaissent à l'inverse peu influencée ou positivement par l'éloignement à la haie comme le montrent également certains articles cités précédemment. La proportion de haie dans un rayon d'un kilomètre autour du mât de mesures affiche également une activité croissante.

Concernant les **milieux ouverts**, bien que moins attractifs pour la plupart des chiroptères, ces habitats ne sont pas pour autant négligeables, notamment pour les espèces chassant en milieu ouvert comme les noctules et qui présentent un haut risque de collision (Bas *et al.* 2014). Ainsi, même les espaces « défavorables » aux chiroptères comme les grandes plaines agricoles peuvent causer de fortes mortalités (Brinkmann *et al.* 2011). Les résultats de la présente étude affichent une influence significative positive de la surface de milieux ouverts sur l'activité pour la majorité des espèces de chiroptères. À noter également que dans un rayon d'un kilomètre plus la surface de prairies est élevée plus il y a de contacts de chiroptères à l'inverse des cultures.



Quel que soit le milieu d'implantation des éoliennes, il apparaît nécessaire de quantifier l'activité des chiroptères dans ces secteurs et de mettre en place des mesures adaptées pour éviter tout risque de collision (Kelm *et al.* 2014, Boughey *et al.* 2011). En effet, Lintott *et al.* en 2016 relèvent le fait que des sites ayant été perçus comme "pauvres" en termes de qualité pour les chiroptères lors des inventaires pré-implantation peuvent montrer des victimes après la construction des éoliennes. Cela pourrait être lié à un changement de comportement après l'implantation des éoliennes, qui nécessiterait l'élaboration de stratégies d'atténuation, avec une compréhension du comportement des chauves-souris pouvant différer sur les sites après que les turbines aient été construites.

Ainsi, la prise en compte de l'ensemble des habitats présents dans le cadre de l'étude d'impact des projets éoliens apparaît primordiale pour anticiper les potentiels risque de mortalité des chiroptères. L'implantation des éoliennes doit également être réfléchi en amont en termes d'éloignement aux habitats naturels favorisant l'activité des chiroptères et en termes de proportions surfacique de ces habitats.

Actuellement les algorithmes multicritères prenant en compte différents critères concomitant permettent d'obtenir des mesures de réduction robustes dans le cadre de l'implantation de parcs éoliens. Il apparaît ainsi nécessaire d'intégrer le plus de critères possibles pouvant influencer l'activité des chiroptères comme les caractéristiques paysagères notamment à 10 km autour, les variables météorologiques, la saisonnalité et le fonctionnement des éoliennes qui seraient plus efficace que les bridages actuels vent/température (Barré *et al.* 2023).

3.3. Perspective de l'étude

Plusieurs questions restent en suspens à l'issue de ces premières analyses :

- Quelles sont les autres variables qui influencent l'activité chiroptérologique (pluviométrie, pression atmosphérique, émergence d'insectes, nébulosité, etc.) ? Et comment les prendre en compte ?
- Comment analyser plus finement les pics d'activité potentiellement liés aux passages migratoires de certaines espèces de chiroptères ?
- Comment évolue ces résultats au cours du temps dans un contexte de changement climatique ? Une réanalyse des résultats avec une comparaison tous les 5 à 10 ans permettrait-elle de voir une influence des changements globaux sur la richesse spécifique, l'activité, la sélection de variables temporelles, météorologiques ou environnementales des chiroptères ?



BIBLIOGRAPHIE

- *Amorim F. Rebelo H. Rodrigues L. 2012.* Factors influencing bat activity and mortality at a wind farm in the Mediterranean region. *Acta Chiropterologica* 14(2): 439-457.
- *Arnett E.B. Huso M.M.P. Schirmacher M. & Hayes J.P. 2011.* Altering turbine speed reduces bat mortality at wind-energy facilities. *Front Ecol. Environ.* 2011, 9(4): 209– 214.
- *Arnett E.B. Barclay R.M.R & Hein C.D. 2013a.* Thresholds for bats killed by wind turbines. *Frontiers in Ecology and the Environment* 11: 171–171. doi:10.1890/15409295-11.4.171 & 2013a
- *Arnett E.B. 2006.* A preliminary evaluation on the use of dogs to recover bat fatalities at wind energy facilities. *Wildlife Society Bulletin* 34(5): 1140-1145.
- *Arnett E.B. Huso M.M.P. Reynolds D.S. & Schirmacher M. 2007.* Patterns of preconstruction bat activity at a proposed wind facility in northwest Massachusetts. An annual report submitted to the Bats and Wind Energy Cooperative. Bat Conservation International. Austin, Texas, USA. 35 p.
- *Arnett E.B. Brown W.K. Erickson W.P. Fiedler J. Hamilton B.L. Henry T.H. Jain A. Johnson G.D. Kerns J. Koford R.R. Nicholson C.P. O'Connell T. Piorkowski M. & Ta,kersley R. 2008.* Patterns of fatality of bats at wind energy facilities in North America. *Journal of Wildlife Management* 72: in press
- *Arthur L. & Lemaire M. 2015.* Les Chauves-souris de France, Belgique, Luxembourg et Suisse. Deuxième édition. Muséum national d'Histoire naturelle, Paris ; Biotope, Mèze, 544 p. (Hors collection ; 38).
- *Aulagnier S. 2005.* France. in : R. Hutterer, T. Ivanova, C. Meyer-Cords & L. Rodrigues : Bat migrations in Europe. A review of banding data and literature. *Natursch. Biol. Vielf.*, 28 : 41-43.
- *Bach L. & Niemann I. 2011 & 2013.* Monitoring der Fledermausaktivität im Windpark Langwedel – Bericht 2012 – Überprüfung des Abschaltalgorithmus. Unpubl.report to PNE Wind AG, 28 pages.
- *Baerwald E.F. Barclay R.M.R. 2011.* Patterns of activity and fatality of migratory bats at a wind energy facility in Alberta, Canada. *The Journal of Wildlife Management* 75: 1103-1114.
- *Barataud M. & Giosa S. 2012.* Biodiversité des chiroptères et gestions forestières en Limousin : rapport. Groupe Mamm. Herpéto. Limousin, Limoges, 32 p
- *Barclay R.M.R. 1991.* Population Structure of Temperate Zone Insectivorous Bats in Relation to Foraging Behaviour and Energy Demand. *Journal of Animal Ecology* 60 (1): 165-178.
- *Bauer K. 1960.* Die Säugetiere des Neusiedlersee-Gebietes (Österreich), Bonn. *Zool. Beitr.* 11(2-4): 141-344.
- *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 (2023) 1614047
- *Barré K., Froidevaux J.S.P., Leroux C., Mariton L., Fritze M., Kerbiriou C., Le Viol I., Bas Y., Roemer C. 2022.* Over a decade of failure to implement UNEP/EUROBATS guidelines in wind energy planning: A call for action. *Conservation Science and Practice.* 2022;4:e12805.
- *Barre, K., L., 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.



- *Barré K., Le Viol I., Juillard R., Chiron F. 2017.* Tillage and herbicide reduction mitigate the gap between conventional and organic farming effects on foraging activity of insectivorous bats. *Ecology and Evolution.* 2017;1–11.
- *Behr O. Brinkmann R. Niermann I. & Korner-Nievergelt F. 2011.* Akustische Erfassung der Fledermausaktivität an Windenergieanlagen. In: Brinkmann, R., Behr, O., Niermann, I. & M. Reich, (Hrsg.): *Entwicklung*
- *Collins J. & Jones G. 2009.* Differences in bat activity in relation to bat detector height: implications for bat surveys at proposed windfarm sites. *Acta Chiropterol.*, 11(2) : 343-350.
- *Cryan P.M. Gorrens P.M. Hein C.D. Schirmacher M.R. Diehl R.H. Huso M.M. Hayman D.T.S. Fricker P.D. Bonaccorso F.J. Johnson D.H. Hesit. H. & Dalton D.C. 2014.* Behavior of bats at wind turbines. *PNAS.* doi: 10.1073/pnas.1406672111
- *Dietz C. Von Helvesen O. & Nill D. 2009.* L'encyclopédie des chauves-souris d'Europe et d'Afrique du Nord : Biologie, caractéristiques, protection. Delachaux et Niestlé, Paris, France. 400 p.
- *Dürr, T. 2007.* Möglichkeiten zur Reduzierung von Fledermausverlusten an Windenergieanlagen in Brandenburg. *Nyctalus (N.F.)* 12 (2-3): 238-252
- *Erickson et al. 2011.* Avian and bat mortality associated with the Vansycle Wind Project, Umatilla County, Oregon: 1999 study year. WEST, Inc. for Umatilla County Department of Resource Services and Development, Pendleton, Oregon. 21 p.
- *Erkert H.G. 1982.* Ecological aspects of bat activity rhythms, p. 201-242. In: T.H. Kunz (Ed.). *Ecology of bats.* New York, Plenum Press, XVIII+425p.
- *Georgiakakis, P. Kret E. Cárcamo B. Doutau B. Kafkaletou-Diez A. Vasilakis D. & Papadatou E. 2012.* Bat fatalities at wind farms in north-eastern Greece. *Acta Chiropterologica* 14 (2): 459-468.
- *Gerell-Lundberg K. & Gerell R. 1994.* The mating behaviour of the pipistrelle and the Nathusius' pipistrelle (Chiroptera) - A comparison. *Folia Zoologica* 43 (4): 315-324.
- *Hedenström A. 2009.* Optimal migration strategies in bats. *Journal of Mammalogy*, 90(6):1298–1309, 2009
- *Horn J.W. Arnett E.B. & Kunz T.H. 2008.* Behavioral responses of bats to operating wind turbines. *The Journal of Wildlife Management* 72(1): 123-132
- *Holzhaider J. & Zahn A. 2001.* Bats in the Bavarian Alps : species composition and utilization of higher altitudes in summer. *Z. Säugetierk.*, 66(2) : 144-154.
- *Hull C.L. & Cawthen L. 2013.* Bat fatalities at two wind farms in Tasmania, Australia: Bat characteristics, and spatial and temporal patterns. *New Zealand Journal of Zoology* 40(1): 5–15
- *Hutterer R. Ivanova T. Meyer-Cords C. & Rodrigues L. 2005.* Bat migrations in Europe. A review of banding data and literature. *Natursch. Biol. Vielf.*, 28 : 3-162 + app.
- *Johnson G.D. Erickson W.P. Strickland M.D. Shepherd M.F. & Shepherd D.A. 2003.* Mortality of bats at a Large-scale wind power development at Buffalo Ridge, Minnesota. – *Am. Midl. Nat.* 150: 332-342.
- *Kaňuch P. and Krištín A. 2007.* Factors influencing bat assemblages in forest parks. *Ekológia (Bratislava)* 24:45–56.



- *Kapfer G. & Aron S. 2007.* Temporal variation in flight activity, foraging activity and social interactions by bats around a suburban pond. *Lutra*, 50(1) : 9-18.
- *Kerns J. Erickson W.P. & Arnett E.B. 2005.* Bat and bird fatality at wind energy facilities in Pennsylvania and West Virginia in Relationships between bats and wind turbines in Pennsylvania and West Virginia: an assessment of fatality search protocols, patterns of fatality, and behavioral interactions with wind turbines, Pour Bat and Wind Energy Cooperative. E.B Arnett, ed. pp. 24-95.
- *Kronwitter F. 1988.* Population structure, habitat use and activity patterns of the Noctule bat, *Nyctalus noctula* Schreb., 1774 (Chiroptera: Vespertilionidae) revealed by radio-tracking. *Myotis*, 26: 23 -85 .
- *Le Campion T. & Dubos T. 2017.* Etude la migration des chauves-souris en Bretagne 2013-2016 : rapport final mai 2017. G.M.B., 52 p.
- *Leroux C., Le Viol I., Valet N., Kerbiriou C., Barré K. 2023.* Disentangling mechanisms responsible for wind energy effects on European bats. *Journal of Environmental Management* 346 (2023) 118987
- *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* - June 2022
- *Limpens H.J.G.A. Boonman, M. Korner-Nievergelt F. Jansen E.A. Van der Valk M. La Haye M.J.J. Dirksen S. & Vreugdenhil S.J. 2013.* Wind turbines and bats in the Netherlands - Measuring and predicting. Report 2013. 12, Zoogdiervereniging & Bureau Waardenburg.
- *Lloyd J.D., Butryn R., Pearman-Gillman S., Allison T. 2023.* Seasonal patterns of bird and bat collision fatalities at wind turbines. *PLoS ONE* 18(5): e0284778.
- *Mariton L., Le Viol I., Bas Y., Kerbiriou C. 2023.* Characterising diel activity patterns to design conservation measures: Case study of European bat species. *Biological Conservation* 277 (2023) 109852
- *Mariton L., Kerbiriou C. Bas Y., Zanda B., Le Viol I. 2022.* Even low light pollution levels affect the spatial distribution and timing of activity of a “light tolerant” bat species. *Environmental Pollution* 305 (2022) 119267
- *McAney C.M. & Fairley J.S. 1990.* Observations at summer roosts of the lesser horseshoe bat in co clare. *Ir. Nat. J.* 23(1)
- *Niermann I. Brinkmann R. Korner-Nievergelt F. Behr O. 2011.* Systematische Schlagopfersuche - Methodische Rahmenbedingungen, statistische Analyseverfahren und Ergebnisse. In: Brinkmann, R., Behr, O., Niermann, I. & Reich, M. (ed.): Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen. *Umwelt und Raum* 4: 40-115
- *Norberg U.M. Rayner J.M.V. 1987.* Ecological morphology and flight in bats (Mammalia; Chiroptera): wing adaptations, flight performance, foraging strategy and echolocation. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 316: 335-427
- *Parsons S. & Jones G. 2000.* Acoustic identification of twelve species of echolocating bat by discriminant function analysis and artificial neural networks. *J. exp. Biol.* 203: 2641±2656.
- *Rachwald A. 1992.* Habitat preference and activity of the noctule bat *Nyctalus noctula* in the Bialowieza Primeval Forest. *Acta Theriol.* 37, 413-422.



- *Redell D. Arnett E.B. Hayes J.P. & Huso M. 2006.* Patterns of pre-construction bat activity at a proposed wind facility in south-central Wisconsin. A final report submitted to the Bats and Wind Energy Cooperative. Bat Conservation International. Austin, Texas, USA. 52 p.
- *Rodrigues L. Bach L. Dubourg-Savage M.-J. Goodwin J. & Harbush C. 2008.* Lignes directrices pour la prise en compte des chauves-souris dans les projets éoliens. EUROBATS Publication Series No. 3 (version française). PNUE/EUROBATS Secretariat, Bonn, Germany
- *Roemer C., Bas Y., Disca T. Coulon A. 2020.* Influence of landscape and time of year on bat-wind turbines collision risks. *Landscape Ecology* 34 pp.2869-2881
- *Roemer C., Coulon A., Disca T., Bas Y. 2019.* Bat sonar and wing morphology predict species vertical niche. *J. Acoust. Soc. Am.* 145 (5), May 2019
- *Russ J.M. 1999a.* The bats of Britain and Ireland. Echolocation calls, sound analysis and species identification. Newtown: Alana Books. 102
- *Russ J.M. 1999b.* The Microchiroptera of Northern Ireland: community composition, habitat associations and ultrasound. Unpubl. PhD thesis, The Queen's University of Belfast
- *Rydell J. Bach L. Dubourg-Savage M.-J. Green M. Rodrigues L. & Hedenström A. 2010a.* Bat mortality at wind turbines in northwestern Europe. *Acta Chiropterologica* 12(2): 261-274
- *Rydell J. Bach L. Dubourg-Savage M.-J. Green M. Rodrigues L. & Hedenström A. 2010b.* Mortality of bats at wind turbines links to nocturnal insect migration? *Eur. J. Wildl. Res.*, 56(6) : 823-827.
- *Sattler T. & Bontadina F. 2005.* Bases pour l'évaluation écologique de deux secteurs d'installations éoliennes en France sur la base de la diversité et l'activité des chauves-souris. – Compte-rendu succinct, SWILD, Zürich par ordre de Megawatt Eole, Stuttgart, 23p.
- *Seiche K. Endl P. & Lein M. 2007.* Fledermäuse und Windenergieanlagen in Sachsen – Ergebnisse einer landesweiten Studie. *Nyctalus (N.F.)* 12 (2-3): 170-181
- *Silva R. 2009.* Effet des conditions météorologiques sur l'activité de chasse des Chiroptères. M.N.H.N., C.R.B.P.O., 36p.
- *Swift S.M. 1980.* Activity patterns of pipistrelle bats (*Pipistrellus pipistrellus*) in north-east Scotland. *Journal of Zoology*, London, 190, 285-295.
- *Whitaker J.O.Jr. 1998.* Life history and roost switching in six summer colonies of eastern pipistrelles in buildings. *Journal of Mammalogy* 79 (2): 651-659.