

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

Rédacteur(s) : Marie Labouré

Analyste (s) : Thomas Girard et Marie Labouré

Comité de lecture :

Michaël LEROY, Responsable du pôle écologie de Limoges, Chiroptérologue
Pierre PAPON, Docteur en Géographie, Directeur du pôle écologie d'ENCIS Environnement
Sylvain LE ROUX, Docteur en Géographie, Directeur d'ENCIS Environnement

Date : 08/06/2020



Sommaire

RÉSUMÉ	3
INTRODUCTION	3
1. MATÉRIELS ET MÉTHODES	4
1.1. COLLECTE ET ANALYSE DES SONS	4
1.2. ATTRIBUTION DES DONNEES METEOROLOGIQUES ET HORAIRES	4
1.3. ANALYSES MENEES SUR LE JEU DE DONNEES	4
1.4. LIMITES DE L'ETUDE	5
2. RÉSULTATS	6
2.1. REPARTITION DES ESPECES EN FONCTIONS DE DIFFERENTES PERIODES	6
2.1.1. <i>Analyse de la diversité spécifique sur le cycle complet</i>	6
2.1.2. <i>Analyse de la diversité spécifique et de l'activité des chiroptères par mensualité sur le cycle complet</i>	7
2.1.3. <i>Analyse de l'activité journalière des chiroptères sur le cycle complet</i>	8
2.2. MISE EN PARALLELE DE LA VITESSE DE VENT NOCTURNE ET DE L'ACTIVITE CHIROPTEROLOGIQUE	9
2.3. MISE EN PARALLELE DE LA TEMPERATURE NOCTURNE ET DE L'ACTIVITE CHIROPTEROLOGIQUE	10
2.4. REPARTITION DE L'ACTIVITE EN FONCTION DU CYCLE CIRCADIEN	11
2.5. ANALYSE MULTIVARIEE DE L'INFLUENCE DES DIFFERENTES VARIABLES SUR L'ACTIVITE DES CHIROPTERES ..	12
3. CONCLUSION ET DISCUSSION	13
3.1. REPARTITION EN HAUTEUR DE L'ACTIVITE ET DES ESPECES AU COURS DU TEMPS	13
3.2. REPARTITION DE L'ACTIVITE EN HAUTEUR EN FONCTION DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES	14
3.3. REPARTITION DE L'ACTIVITE EN HAUTEUR EN FONCTION DU CYCLE CIRCADIEN	16
3.4. ANALYSE MULTIVARIEE DE L'INFLUENCE DES DIFFERENTES VARIABLES SUR L'ACTIVITE DES CHIROPTERES ..	17
3.5. PERSPECTIVE DE L'ETUDE	17
BIBLIOGRAPHIE	18



RÉSUMÉ

Afin de mettre à jour et approfondir l'article d'ENCIS Environnement de mars 2018, deux années d'études ont été ajoutées au jeu de données d'origine. Ainsi, cinq années d'études sur mâts de mesures météorologiques à différentes hauteurs réparties sur 40 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. Afin de cibler sur 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. 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.

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

INTRODUCTION

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

L'influence de la température sur la présence de chiroptères est particulièrement controversée dans la bibliographie. Des articles concluent à une corrélation positive de ces deux variables (Redell *et al.* 2006, Arnett *et al.* 2007, Baerwald and Barclay 2011), alors que d'autres ne considèrent pas ce paramètre en tant que facteur influant sur les chauves-souris (Kerns *et al.* 2005, Horn *et al.* 2008). Arnett *et al.* en 2006 démontrent que l'activité des chiroptères au-dessus de 44 m n'apparaît pas comme affectée par les températures.

Concernant les conditions de vitesses de vent, 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).

Enfin, certains articles présentent des répartitions différentes au cours de la nuit en fonction du groupe d'espèces voire de l'espèce. Les pipistrelles, noctules et sérotines sont considérées comme des espèces crépusculaires et sont remplacées peu à peu au cours de la nuit par des espèces plus nocturnes à l'instar des barbastelles, murins et oreillards (Barataud 2012). D'autres études suggèrent un regain d'activité à l'aube (Swift 1980) comme pour les noctules, et plus particulièrement la Noctule commune, qui affichent ce second pic d'activité en fin de nuit (Kronwitter 1988, Rachwald 1992, Kanuch 2007, Arthur et Lemaire 2015). L'étude de la répartition altitudinale nous montre que les différents groupes d'espèces de chauves-souris se répartissent selon un gradient assez sectorisé comme l'illustrent Collins & Jones 2009 et Sattler & Bontadina 2005.

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 SFPEM 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 194 787 données chiroptérologiques et 860 606 données météorologiques nocturnes. Ces données sont enregistrées sur des mâts de mesures météorologiques au-dessus de 70 m de hauteur et lors des saisons de 2015 à 2020. Elles sont issues de 39 sites d'inventaire comprenant une majorité de sites à tendances bocagères puis des sites forestiers 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 mise en place 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.

- *Analyse statistique des variables citées précédemment.*

Afin, de définir les variables influençant le plus l'activité des chiroptères des tests statistiques ont été menés. Ces tests sont des modèles de régressions linéaires multiples, avec la mise en place d'anova et une comparaison deux à deux via des tests de Tukey. Ces tests permettent également de mettre en évidence des valeurs apparaissant comme seuil en fonction des différentes variables.

1.4. Limites de l'étude

Au cours de cette étude certaines limites sont apparues :

- 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'aire biogéographique,
- la localisation des mâts de mesures : la majorité des sites étudiés est représentative du milieu bocager. L'intégralité des mâts est cependant installée au sein de zones ouvertes, les lisières se situent au minimum à 50 m des dispositifs.

2. RÉSULTATS

2.1. Répartition des espèces en fonctions de différentes périodes

2.1.1. Analyse de la diversité spécifique sur le cycle complet

La répartition des contacts des différentes espèces de chiroptères sur le cycle complet affiche une dominance des Pipistrelles communes et de Kuhl avec 56 % 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 (16 %), la Grande Noctule (5 %) et la Noctule commune (4 %). La Sérotine commune bien que beaucoup moins contactée affiche un minimum de 5 % des contacts enregistrés. Les autres espèces ou groupes d'espèces affichent un nombre de contacts inférieur à 5 %. À noter la présence au-delà de 70 m de quelques Barbastelle d'Europe, d'Oreillard et de Murins.

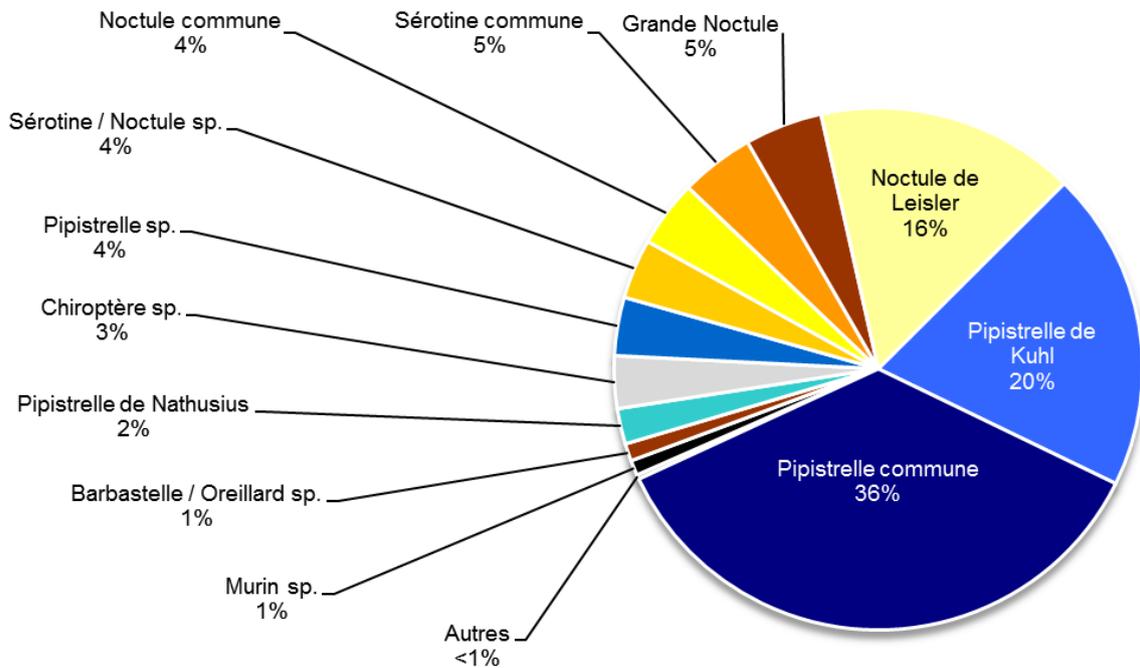


Figure 1 : Répartition des contacts de chiroptères sur le cycle complet

2.1.2. 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 affichent également le plus de contacts de Pipistrelle de Nathusius 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.

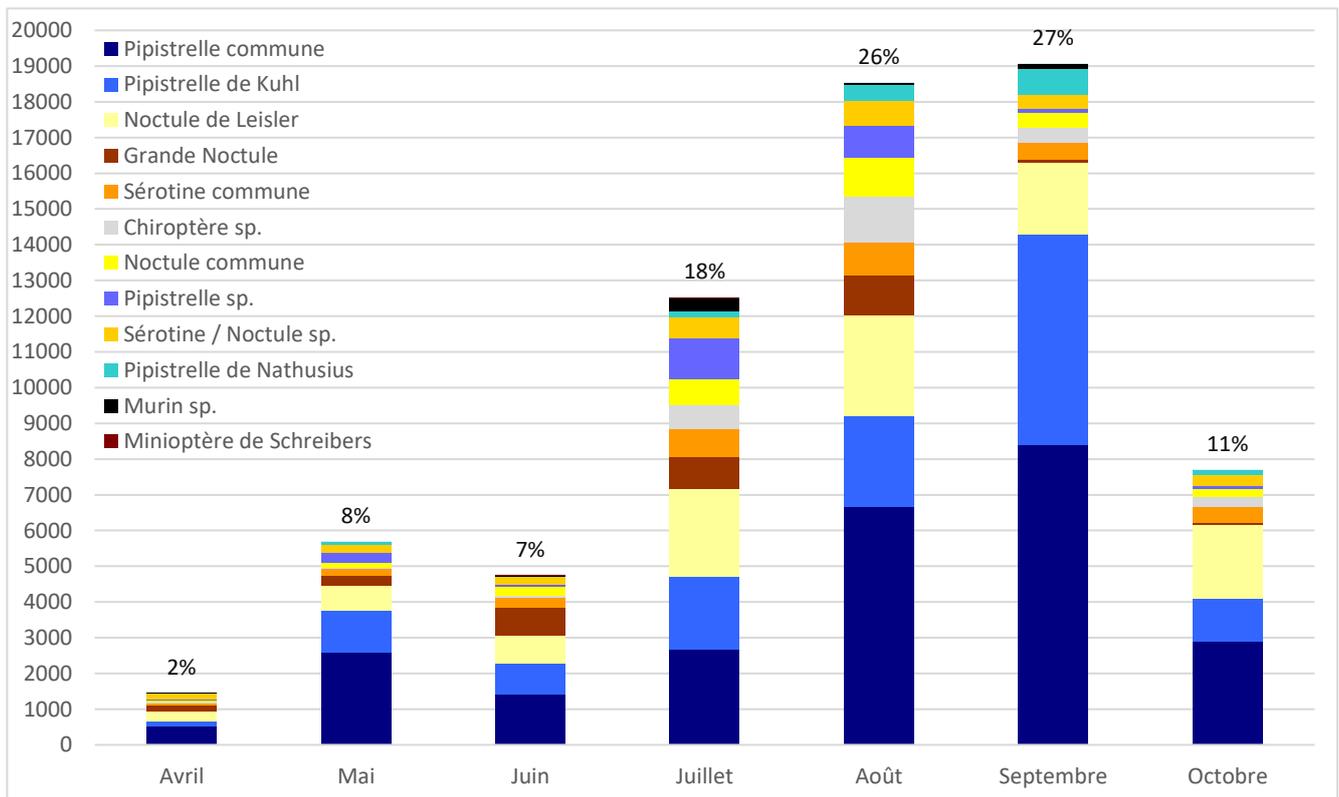


Figure 2 : Répartition des contacts de chiroptères en fonction de la mensualité

2.1.3. 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. Le nombre de pics d'activité apparaît comme plus récurrent et élevé au fil de l'année.

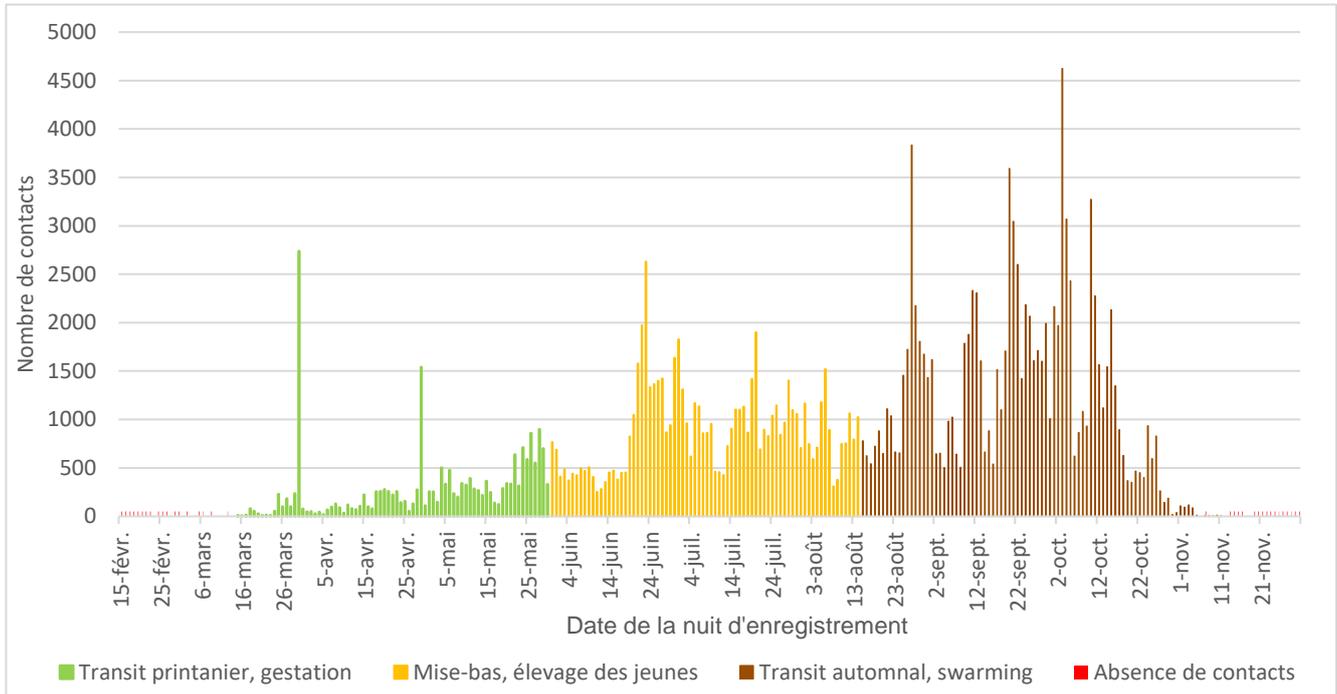


Figure 3 : Répartition des contacts de chiroptères en fonction de la nuit d'enregistrement

Dans un premier temps, les différentes phases du cycle biologique des chiroptères sont caractérisées par la sortie d'hibernation où les femelles rejoignent les sites de gestation et de mise-bas au printemps. S'en suit la phase de mise-bas et d'élevage des jeunes qui nécessite un fort besoin en ressource alimentaire. Les transits automnaux et le « swarming » enfin, 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 ainsi plus de la moitié de l'activité annuelle.

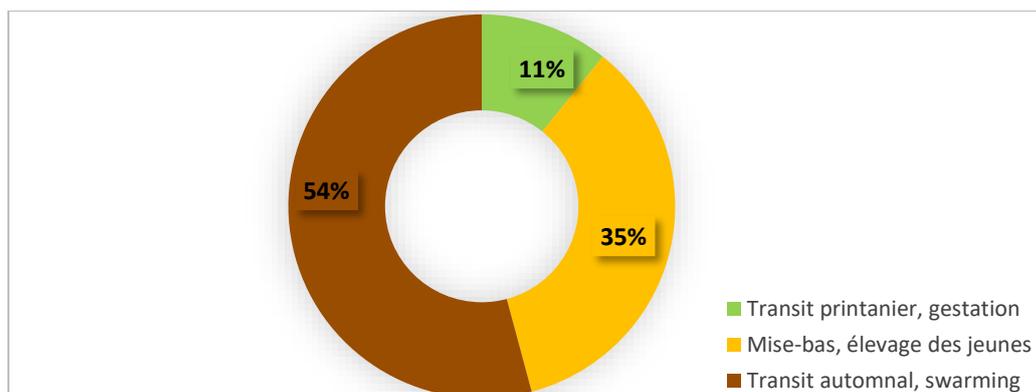


Figure 4 : Répartition des contacts de chiroptères en fonction de la phase du cycle biologique

2.2. Mise en parallèle de la vitesse de vent nocturne et 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 2,5 m/s. Notons que des contacts de chauves-souris ont été détectés jusqu'à 12,5 m/s soit 45 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.

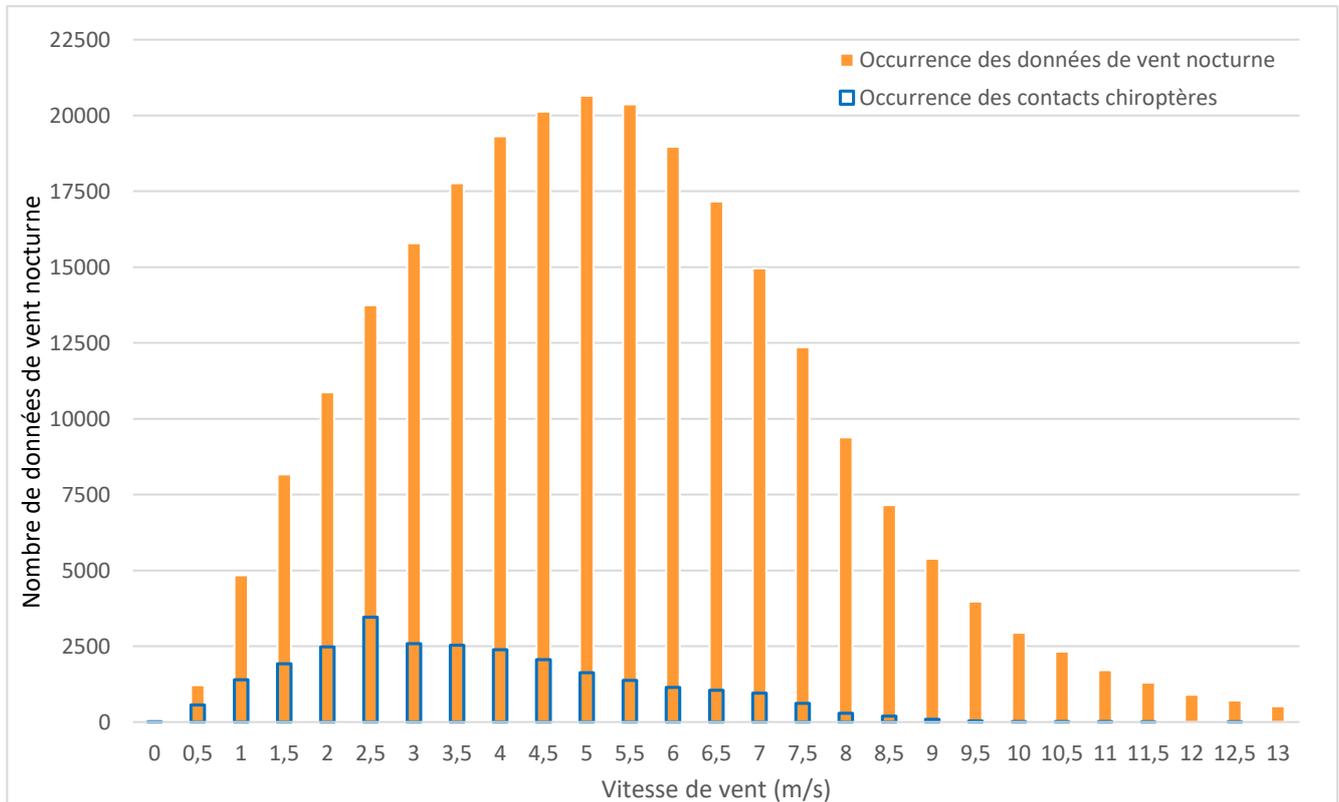


Figure 5 : Répartition de l'activité chiroptérologique en fonction des vitesses de vent nocturnes

2.3. Mise en parallèle de la température nocturne et de l'activité chiroptérologique

La répartition des contacts de chiroptères sur l'histogramme des occurrences de températures nocturnes affiche une sélection pour les températures plutôt élevées avec un maximum de contacts à 20 °C. À noter que des chiroptères sont également contactés à des températures inférieures à 5 °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.

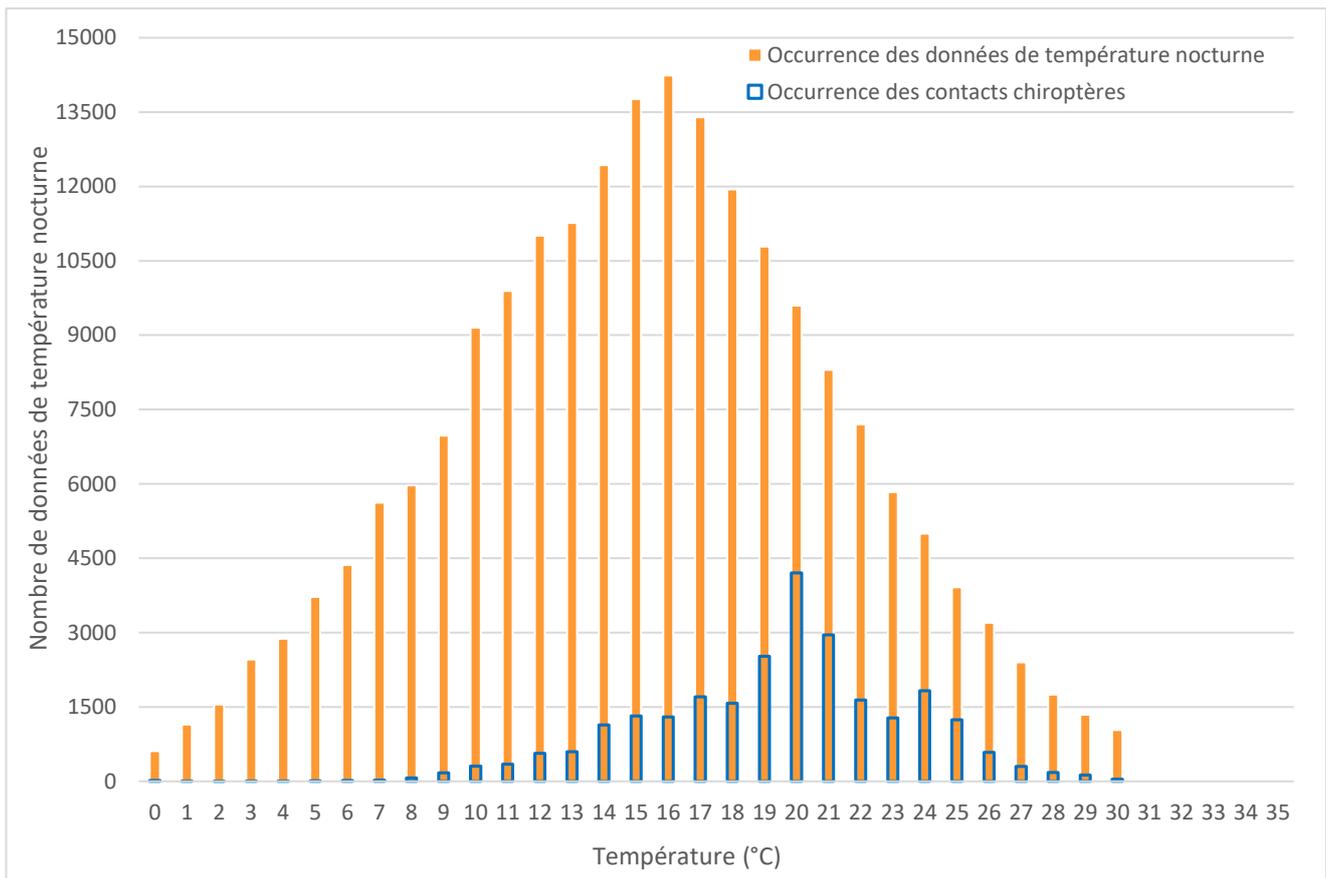


Figure 6 : Répartition de l'activité chiroptérologique en fonction des températures nocturnes

2.4. 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 est cependant observable 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 est observable jusqu'à fin octobre (arrêt des inventaires acoustiques).

Quelques points chauds sont remarquables :

- un premier point chaud est observable en début de nuit dans le courant du mois de mai,
- de juin à mi-août l'activité est fortement concentrée dans les quatre premières heures de la nuit et s'étend dans une moindre mesure jusqu'au lever du soleil,
- de mi-août à fin septembre l'activité est élevée du coucher du soleil jusqu'à une heure 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,
- le mois d'octobre affiche une concentration des contacts de chiroptères dans les deux à quatre premières heures suivant le coucher du soleil.

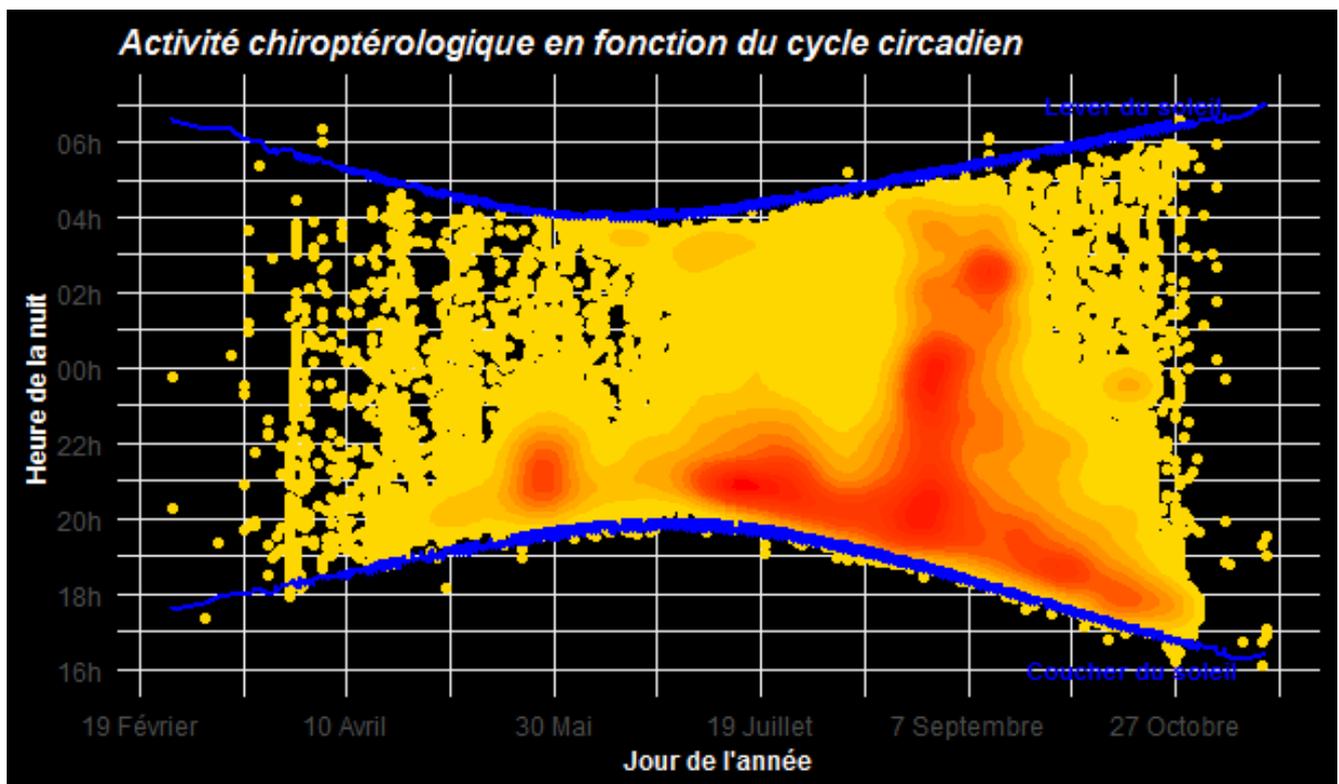


Figure 7 : Répartition de l'activité chiroptérologique en fonction du cycle circadien

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.

2.5. Analyse multivariée de l'influence des différentes variables sur l'activité des chiroptères

Afin d'étudier l'influence de l'ensemble des variables sur l'activité des chiroptères, un modèle de régression linéaire multiple a été réalisé. Les trois variables étudiées influencent très significativement ($p\text{-value}=2^{e-16}$) l'activité des chiroptères. Elles ne l'influencent cependant pas de la même façon :

- la vitesse de vent à une influence négative sur les contacts de chauves-souris. Plus la vitesse de vent augmente, plus le nombre de contacts de chauves-souris est faible,
- la température à une influence positive sur l'activité des chiroptères. Plus la température est élevée, plus le nombre de contacts de chiroptères est élevé,
- l'heure de la nuit influence négativement les contacts de chiroptères. Plus l'heure avance au cours de la nuit, plus le nombre de chiroptères détecté est faible.

Le graphique suivant illustre la répartition des contacts de chiroptères en fonction des trois variables étudiées. À ces résultats sont ajoutées les valeurs charnières pour la vitesse de vent et l'heure de la nuit sous forme de ligne.

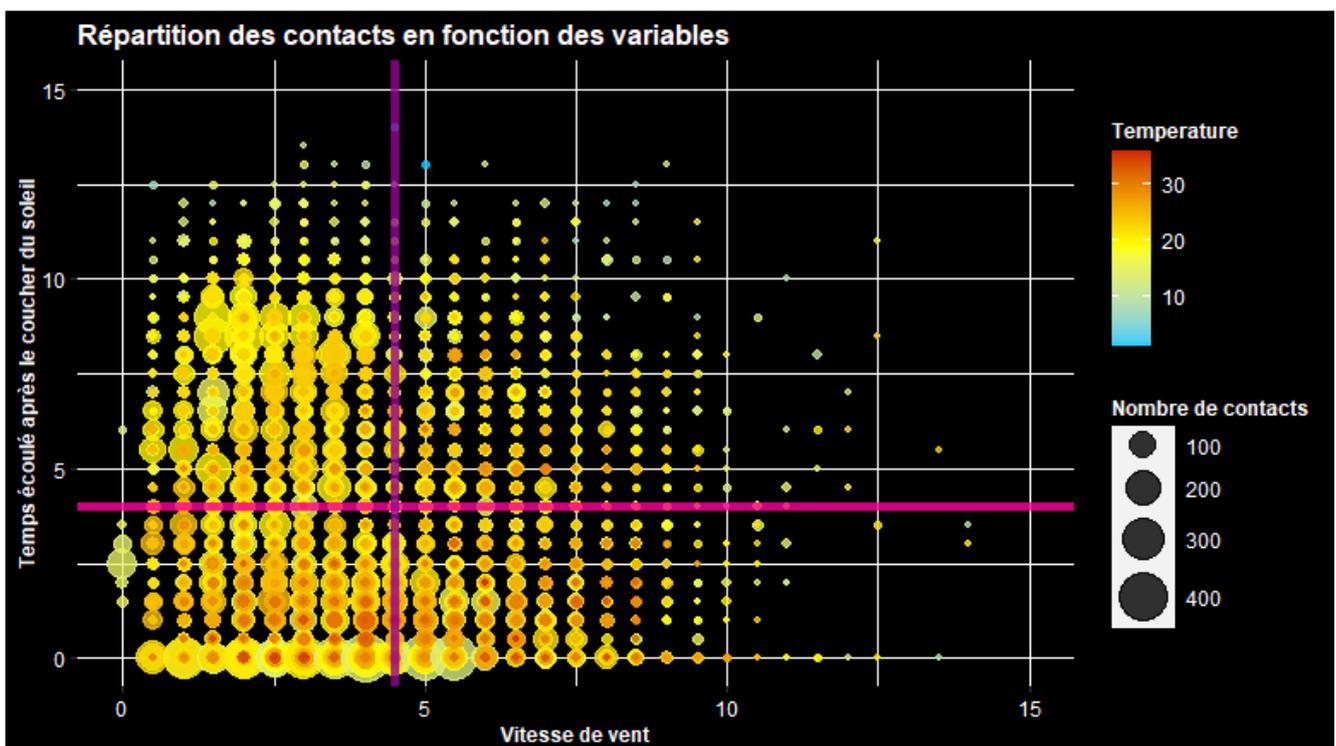


Figure 8 : Répartition de l'activité chiroptérologique en fonction des trois variables étudiées

3. Conclusion et discussion

3.1. Répartition en hauteur de l'activité et des espèces au cours du temps

Les résultats obtenus dans cette étude sont basés sur des enregistrements réalisés à plus de 70 m de hauteur sur des mâts de mesures météorologiques.

La diversité spécifique ainsi que l'activité des chiroptères à cette hauteur sont très différentes de celles enregistrées au sol. Plusieurs auteurs s'accordent en effet sur ces différences notables. C'est ainsi que Roemer *et al.* 2014 décrivent une diminution de l'activité et de la diversité des espèces de chiroptères corrélée avec l'augmentation de la hauteur d'écoute. Selon les auteurs, au-delà de 49 m, l'activité et la diversité des chauves-souris ont diminué de moitié et les résultats affichent la présence de cinq espèces à savoir la Pipistrelle commune, la Sérotine commune, la Noctule de Leisler, la Noctule commune et la Pipistrelle de Nathusius. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans la présente étude. Les espèces contactées en plus grande proportion sont en effet la Pipistrelle commune, la Pipistrelle de Kuhl, les trois espèces de noctules européennes et la Sérotine commune. Ces espèces sont également citées par Felt *et al.* en 2015, comme évoluant régulièrement à hauteur des nacelles d'éoliennes en Allemagne.

Des risques notables de mortalité dans le cadre des projets éoliens sont mis en évidence (Dürr 2020, SFPEM 2015, Eurobats), il apparaît donc nécessaire d'affiner la répartition des contacts de ces espèces au cours du temps et en fonction des variables environnementales pouvant l'influencer.

Les résultats 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 11 % des contacts enregistrés ; en phase de mise-bas et élevages des jeunes elle affiche 34 %, et en période de transits automnaux elle cumule 54 % 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, 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 constatée 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 suivi 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.* illustraient 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 mesure pour la protection des chiroptères par périodicité mensuelle apparaît ainsi comme la meilleure solution.

3.2. Répartition de l'activité en hauteur en fonction des conditions météorologiques

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 concentrée 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 enclin 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.

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 d'autant plus mitigées. La pression atmosphérique (Cryan and Brown 2007 ; Kern *et al.* 2005), le rayonnement lunaire (Baerwald and Barclay 2011 ; Cryan *et al.* 2014) 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).



3.3. Répartition de l'activité en hauteur en fonction du cycle circadien

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 juin. 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 juin 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 (Holzhaidner *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.



3.4. Analyse multivariée de l'influence des différentes variables sur l'activité des chiroptères

L'activité des chiroptères est ainsi liée à plusieurs variables bien différentes (vent, température et horaire). Bien qu'indépendantes les unes des autres, ces trois variables influencent significativement la présence des chiroptères. Ainsi, ces trois 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. 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.

3.5. 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 ?
- Quelle est l'influence de l'habitat environnant des sites étudiés sur l'activité et la répartition des contacts de chiroptères ?
- Comment analyser plus finement les pics d'activité potentiellement liés aux passages migratoires de certaines espèces de 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. & Niermann 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.
- *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. Gorrensens 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 Helversen 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.
- *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.
- *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
- *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.