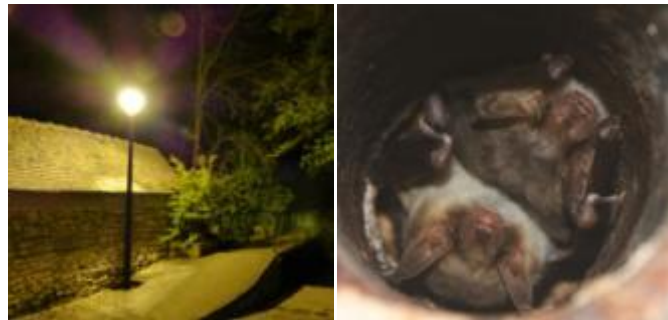

Rapport de stage 2^{ème} année – M2IEGB

1^{er} mars – 30 aout 2014

VERNET Arthur

Analyse de l'effet de la gestion de l'éclairage public sur l'activité des Chiroptères dans le Parc naturel régional du Gâtinais français



Parc naturel régional du Gâtinais français

20 boulevard du Maréchal Lyautey ; 91490 Milly-la-Forêt

Julie MARATRAT

Chargée d'études milieux naturels

**Muséum National d'Histoire Naturelle, CESCO, UMR 7204
MNHN-CNRS-UPMC**

55 rue Buffon ; 75005 Paris

Clémentine AZAM

Doctorante

Sommaire

Introduction	1
1. Contexte de l'étude :	1
2. Etat de l'art :	2
3. Programme et Réalisation	5
Matériels et Méthodes	6
1. Le territoire du Parc naturel régional du Gâtinais français	6
A. Localisation géographique et contexte économique et social	6
B. Les habitats présents sur le territoire du PNRG	6
C. Les Chauves-souris présentes sur le PNRG	6
2. Les protocoles utilisés	7
A. Le protocole Vigie Chiro	7
1. Vigie Chiro routier	7
2. Les circuits du PNRG	8
B. Le protocole Point Fixe.....	8
3. L'Analyse acoustique	9
A. Principes	9
B. Analyse des enregistrements Vigie Chiro	9
C. Analyses des enregistrements du protocole Point Fixe.....	10
4. Présentation des variables explicatives.....	10
A. Les variables de lumière	10
B. Les variables habitats et météorologiques.....	10
5. Analyses statistiques.....	11
A. Principes	11
B. Gestion de l'éclairage public (Analyses Vigie Chiro)	12
C. Effet de l'extinction (Analyses protocole Point Fixe)	12

D. Effet de l’extinction sur les tendances de population du Gâtinais	13
Résultats	13
1. Analyse Vigie Chiro, effets de la gestion de l’éclairage public	13
A. Données récoltées	13
B. Résultats pour les variables habitats et météorologiques	13
C. Résultats pour la lumière moyenne par secteur	14
D. Résultats pour le nombre de lampadaires	14
E. Résultats pour l’extinction à l’échelle communale	14
F. Résultats pour l’extinction durant le circuit	14
2. Analyse du protocole Point Fixe, l’effet de l’extinction	15
A. Données récoltées	15
B. Résultats pour la Pipistrelle commune	15
C. Résultats pour les Pipistrelles de Nathusius / Kuhl	15
D. Résultats pour les Sérotules	15
E. Résultats pour les Myotis	15
3. Analyse de l’effet de l’extinction sur les tendances de populations du PNRG du Gâtinais	15
Discussion	16
1. Effet de l’éclairage public, analyses Vigie Chiro	16
A. <i>L’effet des variables habitats et météorologiques</i>	16
B. <i>L’effet de la lumière moyenne par secteur</i>	16
C. <i>L’effet du nombre de lampadaires</i>	17
D. <i>L’effet des variables extinctions</i>	17
2. L’effet de l’extinction, analyses du protocole POINT FIXE	18
3. Effet de l’extinction sur les tendances de populations du Gâtinais	19
4. Bilan sur l’extinction	19
5. Discussion des protocoles	19
Conclusion	20
Bibliographie	
Annexes	

Table des Figures

Figure 1: L'éclairage nocturne en France

Figure 2: Localisation du Parc naturel régional du Gâtinais français (PNRG) en région Ile de France.

Figure 3: Les habitats principaux présents sur le PNRG

Figure 4: Les 10 circuits réalisés sur le PNRG et description d'un circuit

Figure 5: Dispositif expérimental du protocole Point Fixe, site éclairé avec lampadaire et site noir sans lampadaire. Les 2 sites sont situés dans un même milieu.

Figure 6: Position des 33 sites appariés (Eclairés/ Noirs) sélectionnés pour le protocole Point Fixe sur le territoire du PNRG

Figure 7: Exemple d'une des distributions d'une variable réponse (ici la pipistrelle commune avec le protocole Vigie Chiro)

Figure 8 : L'activité de la pipistrelle commune en fonction du Log de la lumière moyenne par secteur.

Figure 9: Barplot des estimates avec écart type présentant pour chaque espèce l'effet de l'extinction, (0: secteurs sans extinction; 1: secteurs avec extinction). Les étoiles (*) représentent la significativité des résultats (* : p-value<0,05 ; ** : p-value<0,01 ; *** : p-value<0,001).

Figure 10: Barplot des estimates avec écart type présentant pour chaque espèce l'effet de l'extinction pendant le circuit (éclairés (0), avec lampadaires éteints (1) ou dans le noir sans présence de lampadaires (2)). Les étoiles (*) représentent la significativité des résultats : (* : p-value<0,05 ; ** : p-value<0,01 ; *** : p-value<0,001).

Figure 11: Barplot des estimates avec écart type présentant pour chaque espèce l'effet de l'extinction sur l'activité des Chiroptères sur l'ensemble de la nuit d'enregistrement pour le protocole Point Fixe, (0: Site "noir"; 1: Site avec lampadaire qui s'éteint au cours de la nuit ; 2 : Site avec lampadaire continuellement allumé). Les étoiles (*) représentent la significativité des résultats (* : p-value<0,05 ; ** : p-value<0,01 ; *** : p-value<0,001).

Figure 12: Courbes des tendances de population entre 2007 et 2013 du PNRG de chaque espèce (** : p-value<0,01)

Liste des Tableaux

Tableau 1: Proportion des habitats principaux présents sur le PNRG pour chaque circuit et comparaison avec le territoire du PNRG.

Tableau 2: Présentation des 19 variables utilisées pour les 2 analyses avec leur description, leur définition statistique et pour quel protocole elles sont utilisées.

Tableau 3: Modèles utilisés pour l'analyse Vigie Chiro

Tableau 4: Modèles utilisés pour l'analyse avec le protocole Point Fixe

Tableau 5: Modèles utilisés pour l'analyse de l'effet de l'extinction sur les tendances de population du PNRG

Tableau 6: Nombre de contacts et de secteurs avec présence pour chaque espèce avec l'étude Vigie Chiro

Tableau 7: Effet de chaque type d'habitat sur l'activité de chaque espèce (avec Estimate, Standard Error et indice de significativité). ns : non significatif ; * : p-value<0,05 ; ** : p-value<0,01 ; *** : p-value<0,001.

Tableau 8: Effet des variables "Nombre de lampadaires" et "Lumière moyenne" sur l'activité de chaque espèce (avec Estimate, Standard Error et indice de significativité) .ns : non significatif ; * : p-value<0,05 ; ** : p-value<0,01 ; *** : p-value<0,001.

Tableau 9: Nombre de contacts enregistrés pour chaque espèce avec le protocole Point Fixe

Tableau 10: Effet des variables "Tendance (années) " et le "Nombre d'années d'extinction" sur l'activité de chaque espèce (avec Estimate, Standard Error et indice de significativité). ns : non significatif ; * : p-value<0,05 ; ** : p-value<0,01 ; *** : p-value<0,001.

Remerciements

Je remercie tout d'abord Julie Maratrat pour son encadrement, ses conseils, son aide pour le terrain, pour nos échanges quotidiens toujours très agréables et pour m'avoir fait découvrir le Parc naturel régional du Gâtinais.

Un grand merci à Clémentine Azam pour m'avoir encadré pendant toute la durée de ce stage, pour les très bons moments passés sur le terrain avec elle. J'ai beaucoup apprécié nos échanges sur l'écologie, les chauves-souris, la recherche, etc.

Je remercie vivement Isabelle Le Viol et Christian Kerbiriou pour la transmission de leurs connaissances et leurs précieux conseils tout au long de ce stage, pour leur gentillesse et leur grande disponibilité.

Merci à Yves Bas et à Jean-François Julien pour la transmission de leur passion et leurs conseils en détermination acoustique.

Je remercie également toute la sympathique équipe du Parc du Gâtinais de m'avoir accueilli.

Merci enfin à Lucie et à ma famille pour leur soutien quotidien.

Introduction

1. Contexte de l'étude :

Les causes principales de l'érosion de la biodiversité telles que la fragmentation, la surexploitation, les invasions biologiques et les extinctions en chaînes commencent à être bien connues, (Turner 1996; Brooks *et al.* 2002; Fahrig 2003). Les activités anthropiques sont les principales responsables de cette érosion. Face à ces pressions sur les écosystèmes, il a été nécessaire de mettre en place des mesures de protection pour les espèces (loi de protection de la nature de 1976) et les espaces naturels (Parc national, Parc régional, Réserves, etc.). Le cas des parcs naturels régionaux est intéressant car il concilie à la fois protection de la biodiversité et développement humain en misant sur la sensibilisation et la responsabilisation des acteurs face au développement durable.

En région Ile de France, le cas du Parc naturel régional du Gâtinais français (PNRG) est assez particulier car il est situé dans un contexte de fortes tensions pour l'usage des sols (urbanisation, agriculture, espaces naturels). Situé à proximité de la mégapole parisienne, le PNRG essaye de faire coexister durablement tous ces usages et notamment de prendre en compte la biodiversité dans l'aménagement de son territoire. Pour cela, il a mis en place depuis 2011 la trame verte et bleue (TVB) qui consiste à restaurer et préserver les continuités écologiques. Cependant, l'éclairage n'est pas pris en compte dans l'élaboration des TVB, hors de nombreuses espèces ont besoin de l'obscurité pour se déplacer. Une trame noire doit donc être associée à la TVB. Le PNRG souhaite donc la mettre en place. De plus dans le cadre de l'article R. 583-4 du code de l'environnement du 12 juillet 2011, les espaces naturels dont les Parcs naturels régionaux, sont cités comme espaces sensibles aux installations lumineuses. La lumière artificielle semble en effet avoir un impact sur la biodiversité et l'éclairage public a augmenté de plus de 3% ces 15 dernières années en France (Holker *et al.* 2010) (Figure 1).

Le PNRG sensibilise par ailleurs les communes à limiter leur éclairage public et à pratiquer l'extinction au cours de la nuit dans un contexte d'économie d'énergie et du plan climat du PNRG. Il souhaite par conséquent savoir si cette mesure peut avoir des impacts sur la biodiversité et notamment sur les Chiroptères. Le PNRG étudie depuis 2007 les chauves-souris avec le protocole Vigie Chiro du Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN). Il possède donc un jeu de données important et intéressant à mettre en relation avec les données d'éclairage public.

C'est dans ce contexte que je réalise mon stage : « Analyse de l'effet de la gestion de l'éclairage public sur l'activité des Chiroptères dans le Parc naturel régional du Gâtinais

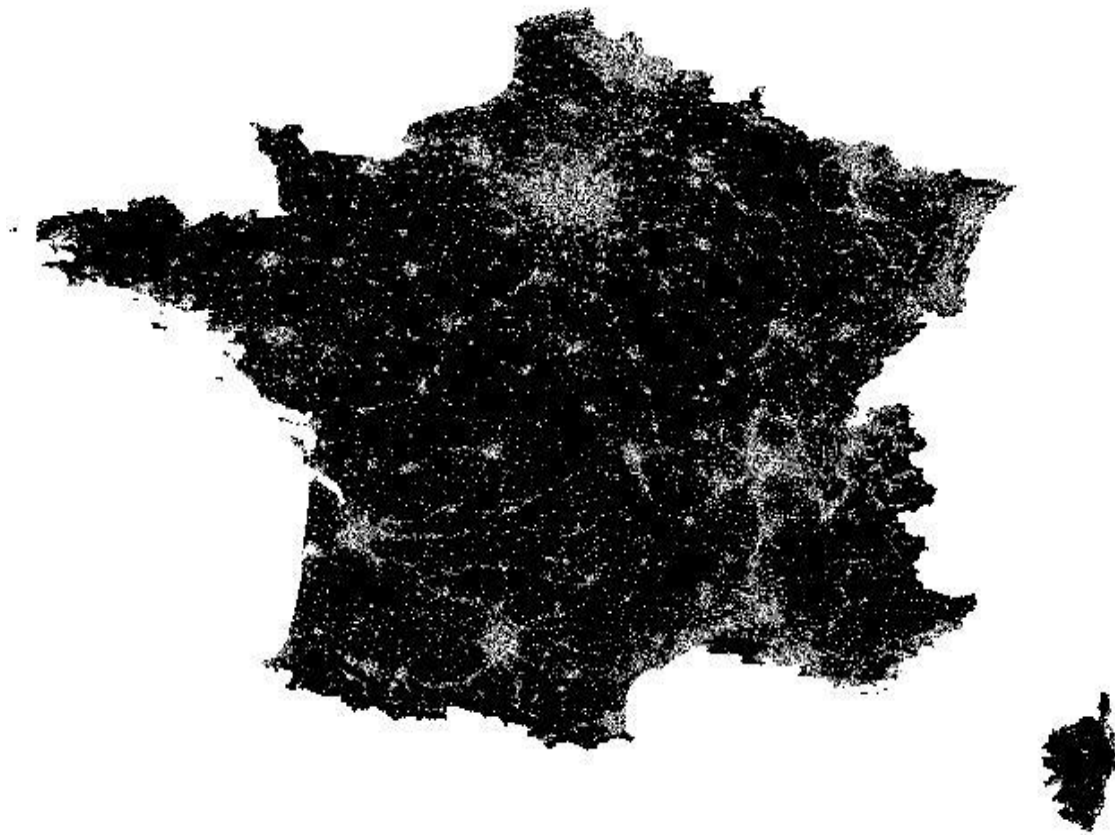


Figure 1: L'éclairage nocturne en France

français ». Ce stage est encadré par le PNRG et le MNHN qui travaille actuellement sur la pollution lumineuse en France dans le cadre d'une thèse. Le financement de ce stage est réalisé par le PNRG, le financement des expérimentations provient du MNHN dans le cadre de la thèse « pollution lumineuse. Julie Maratrat, chargée d'étude au PNRG assure le soutien technique et logistique, Clémentine Azam, doctorante, Isabelle Le Viol, Christian Kerbiriou maîtres de conférence et Jean-François Julien, chercheur CNRS au MNHN (UMR7204 CNRS-MNHN-UPMC) assurent l'encadrement scientifique et technique de ce stage.

2. Etat de l'art :

C'est seulement depuis 2010, grâce au Grenelle de l'environnement que la notion de « pollution lumineuse » a été introduite dans le droit de l'environnement en France. On la définit comme une présence nocturne anormale de lumière pouvant avoir des conséquences sur les écosystèmes (Rich and Longcore 2006). Le sujet de la pollution lumineuse fait partie des 10 questions majeures de la biologie de la conservation, actuellement (Rich and Longcore 2006). Ce terme est apparu dans les années 80, il a été utilisé tout d'abord par les astronomes puis par les écologues. Ces derniers ont commencé à s'intéresser à l'impact que pourrait avoir la lumière sur la biodiversité à la fois à une échelle large (halo lumineux) et locale (lampadaires dans un village) (Rich and Longcore 2006). En effet, sachant que plus de 30 % des mammifères et plus de 60 % des invertébrés sont nocturnes (Hölker *et al.* 2010), l'introduction de lumière artificielle dans l'environnement pourrait perturber les rythmes biologiques et écologiques des espèces. Il serait donc important de prendre en compte la qualité de l'environnement nocturne dans les réseaux écologiques, l'établissement, la protection et la gestion de corridors afin de favoriser leurs utilisations par la biodiversité nocturne (Rich and Longcore 2006).

En effet il a été démontré que l'introduction de l'éclairage artificiel dans l'environnement peut perturber la dynamique des populations en modifiant la physiologie, la mortalité et la perturbation des rythmes biologiques des espèces. Par exemple, certains oiseaux se reproduisant près de lampadaires chantent plus précocement que des individus se reproduisant dans une forêt (Loe *et al.* 2010). De plus, il a été noté que chez la Mésange bleue (*Cyanistes caeruleus*) les femelles pondaient 1,5 jours plus tôt (Loe *et al.* 2010). Chez les mammifères, il a été observé des modifications de leurs comportements de recherche de nourriture, de leur horloge biologique et également une augmentation de risque de prédation et de collisions routières à cause d'un éblouissement (Beier *et al.* 2006). Il a également été montré des modifications sur les déplacements et les distributions d'espèces. Chez les oiseaux il a été

noté de nombreuses collisions pendant leur migration nocturne contre des gratte-ciels illuminés (Longcore *et al.* 2013). Une autre étude a montré que les insectes aquatiques sont influencés par la lumière jusqu'à 40 mètres (Perkin *et al.* 2014). Concernant des changements de distribution spatiale, on a noté chez les invertébrés des changements de communautés (Davies *et al.* 2012) et des pertes de diversités spécifiques (Bates *et al.* 2014). De nombreuses espèces nocturnes sont aussi impactées et le groupe des Chiroptères est particulièrement adapté pour étudier ce type de phénomène et concerné par cette problématique car toutes les espèces sont nocturnes. Ces mammifères sont de bons bio-indicateurs des écosystèmes de par leur régime alimentaire, notamment insectivore, permettant ainsi d'évaluer potentiellement la perturbation lumineuse à des niveaux trophiques inférieurs. De plus, ces mammifères rendent de nombreux services écosystémiques notamment en tant que régulateurs des populations d'insectes (Jones *et al.* 2009; Kunz *et al.* 2011). Ces espèces particulièrement sensibles aux changements d'habitats (Jones *et al.* 2009; Ethier and Fahrig 2011; Tournant *et al.* 2013) et toutes protégées en France semblent donc importantes à étudier dans le cadre de l'impact de la lumière sur la biodiversité. Plusieurs études ont déjà été réalisées pour comprendre comment ces espèces réagissent à la lumière.

La première source de lumière à laquelle chaque espèce s'est adaptée est la lune. On remarque ainsi qu'en période de pleine lune, le comportement des chauves-souris est différent que pendant une nuit sans lune. Contrairement aux espèces tropicales qui sont moins actives durant une nuit de pleine lune à cause d'un risque de prédation plus important, il semble que pour les espèces insectivores des milieux tempérés le comportement de phobie lunaire soit moins important (Karlsson *et al.* 2002; Saldaña-Vázquez and Munguía-Rosas 2013). En effet ayant peu de prédateurs spécialisés, elles ont pour certaines une activité similaire à une nuit sans lune (Hecker and Brigham 2014) et, pour d'autres, une activité plus réduite qui serait dû à une baisse de l'activité de certaines proies (Lang *et al.* 2006).

Par contre le comportement des Chauves-souris face à une source d'éclairage artificiel semble différent et plus accentué. Ainsi, il a été montré une influence de l'éclairage artificiel sur les Chiroptères sur leurs gîtes, leurs déplacements et leurs activités de chasse (Jenkins *et al.* 1998, Rydell 1992; Stone *et al.* 2012).

En effet plusieurs études ont montré qu'une source lumineuse à proximité des sorties des gîtes a de nombreuses conséquences sur la dynamique des populations: directement sur le temps d'émergence et indirectement sur la taille et la survie des jeunes. En effet, la lumière naturelle influe déjà sur l'heure de sortie de gîte, puisque pour des gîtes en milieu fermé les individus sortent plus tôt que pour des gîtes en milieu ouvert (Jenkins *et al.* 1998; Russo *et al.* 2007).

Avec une lumière artificielle éclairant la sortie d'un gîte, les individus sortent plus tard et la durée d'émergence est plus longue pour certaines espèces (Boldogh *et al.* 2007). Certains individus attendent même que la lumière soit éteinte pour sortir, (Boldogh *et al.* 2007). Les mêmes auteurs ont montré que les jeunes présents dans ces colonies éclairés avaient une longueur d'avant-bras et une masse corporelle plus faible que chez des jeunes élevés dans un gîte non-éclairé à la même époque. Cela suggère que la date de mise-bas était plus tardive et/ou que le taux de croissance était plus faible que pour des colonies vivants dans des gîtes non-éclairés (Boldogh *et al.* 2007). En effet, les adultes sortant plus tard peuvent manquer les pics d'émergence d'insectes crépusculaires (Boldogh *et al.* 2007; Jones and Rydell 1994) et donc dépenser plus d'énergie pour se nourrir et allaiter leur jeune. Ceci ayant potentiellement des conséquences sur la fitness des colonies et des populations (Boldogh *et al.* 2007; Jones and Rydell 1994).

En activité de chasse, plusieurs observations et études ont montré que certaines espèces étaient plutôt attirées par les lampadaires alors que d'autres les évitaient radicalement. Les espèces dites « aériennes » (espèces à vol rapide et direct) telles que les pipistrelles (*Pipistrellus sp*), les sérotines (*Eptesicus sp*) et les noctules (*Nyctalus sp.*) sont contactées près des lumières artificielles lorsqu'elles sont en chasse car ces milieux sont riches en insectes attirés par l'éclairage. Alors que les espèces dites « glaneuses » (espèces à vol assez lent et papillonnant) telles que les murins (*Myotis sp*), les rhinolophes (*Rhinolophus sp*) et les oreillardes (*Plecotus sp*) évitent la lumière (Haupt *et al.* 2006; Kuijper *et al.* 2008; Rydell 1992; Stone *et al.* 2012). En activité de transit, des observations similaires ont été faites notamment sur le murin des marais (*Myotis dasycneme*) et le petit rhinolophe (*Rhinolophus hipposideros*) où ces deux espèces contournaient les sources lumineuses, suggérant ainsi un effet barrière de la lumière (Kuijper *et al.* 2008; Stone *et al.* 2009).

Les espèces « glaneuses » éviteraient les sources lumineuses à cause d'un risque de prédation par les oiseaux nocturnes plus important dans ces zones éclairées (Rydell *et al.* 1996) alors que les espèces « aériennes » volant plus rapidement, seraient plus tolérantes et feraient le compromis entre prise de nourriture facile près du lampadaire et risque de prédation (Patriarca and Debernardi 2010). Une autre hypothèse de perturbation due à la lumière pourrait être une sensibilité visuelle faible dans les lumières vives et conditionnerait ainsi un évitement de ces sources lumineuses (Fure 2006; Patriarca and Debernardi 2010). Avec toutes ces informations, la lumière semble jouer sur plusieurs paramètres écologiques à la fois spatiaux et temporels de manière différente selon les espèces. Il semble nécessaire de comprendre comment cette pollution agit sur les tendances temporelles et de répartition spatiale des

communautés de Chauves-souris à échelle fine et large. Cet impact de la lumière dû principalement par l'éclairage public peut être géré par les communes. Certaines d'entre elles pratiquent l'extinction pour en premier lieu des raisons budgétaires (ADEME, 2012) mais cette pratique peut aussi avoir un effet sur les Chiroptères. Le PNRG est un bon territoire d'étude car plus de la moitié des communes éteignent leur lumière durant la nuit. Le but de cette étude est de comprendre les différents effets de l'éclairage public et de sa gestion sur les Chiroptères afin de pouvoir apporter des conseils aux syndicats d'électricités, aux communes et aux collectivités territoriales.

Dans un premier temps nous étudierons avec le jeu de données Vigie Chiro du PNRG, l'effet de la gestion de l'éclairage public sur les Chiroptères. L'étude portera sur l'effet du halo lumineux, de la densité de lampadaires et de l'extinction communale.

Une deuxième partie consistera à confirmer les résultats de la première partie grâce à un protocole mis en place sur le PNRG par le MNHN destiné à étudier l'effet de la lumière et de l'extinction sur les chauves-souris.

Enfin dans un troisième temps, à partir du jeu de données Vigie Chiro nous étudierons les tendances de population des Chiroptères présents sur le territoire du PNRG depuis 2007 et de l'effet de l'extinction pratiqué par certaines communes sur celles-ci.

Nous nous attendons à des réponses différentes selon les espèces. Pour les espèces "aériennes" présentes sur le PNRG (pipistrelles, noctules, sérotine), on peut penser qu'elles seraient présentes sur les secteurs éclairés et que l'extinction leur serait plutôt défavorable. Contrairement aux espèces "glaneuses" (*Myotis sp*) qui elles seraient plutôt dans des secteurs sans lumière et seraient favorisées par les mesures d'extinction.

On s'attend à retrouver les mêmes conclusions avec les deux protocoles.

3. Programme et Réalisation

Pour répondre à la première et dernière question sur les effets des différentes mesures de gestion de l'éclairage et des tendances sur les Chiroptères à l'aide du jeu de données Vigie Chiro : j'ai effectué les relevés acoustiques de 2014, analyser les sons des relevés 2013 puis identifier et rassembler toutes les variables nécessaires afin de créer une base de données pour ensuite réaliser des analyses statistiques pour comprendre les effets des mesures de gestion de l'éclairage sur 4 espèces ou groupes d'espèces (Pipistrelle commune (*Pipistrellus pipistrellus*), Pipistrelle de Nathusius / Kuhl (*Pipistrellus nathusii / kuhlii*), Groupe des Sérotines / Noctules (*Eptesicus/ Nyctalus*) et le groupe des Myotis (*Myotis spp*)). Pour la deuxième question, j'ai réalisé avec Clémentine Azam la mise en place du protocole, les

relevés sur le terrain et l'analyse acoustique des données. La création de la base de données et les analyses statistiques ont été réalisées en collaboration avec Clémentine Azam.

De plus, d'autres missions (non présentées dans ce rapport) m'ont été confiées durant ce stage :

- Evaluation des mesures de réduction et d'arrêt d'utilisation de produits phytosanitaires des communes du PNRG sur l'évolution de la biodiversité (Chiroptères).

- Mettre en place des protocoles de suivi de biodiversité (Chiroptères et Avifaune) sur un domaine agricole qui va passer d'une agriculture conventionnelle à de l'agro-écologie.

Matériels et Méthodes

1. Le territoire du Parc naturel régional du Gâtinais français

A. Localisation géographique et contexte économique et social

Le PNRG créé en 1999 se situe dans le sud de la région Ile de France, à cheval sur les départements de l'Essonne et de la Seine et Marne (Figure 2). Il couvre 69 communes et s'étend sur 75 640 hectares. 82 153 personnes habitent dans le PNRG.

L'économie locale est essentiellement rurale avec plus de 400 exploitations agricoles, le reste de l'économie est surtout tourné vers le bâtiment, les commerces, etc (Charte du PNRG, 2011). L'influence de la région parisienne à proximité est bien présente. La maîtrise de l'urbanisation est un fort enjeu pour le PNRG car depuis 1995, la population a augmenté de 0,88% (contre 0,69% en région Ile de France), (Charte du PNRG, 2011). Le territoire du PNRG est en effet attractif pour sa qualité de vie et sa proximité de Paris.

B. Les habitats présents sur le territoire du PNRG

Le PNRG est composé essentiellement de milieux agricoles (58%), majoritairement de grandes cultures. Les milieux forestiers représentent 31% de la surface du territoire et les milieux urbains 7,5%. Les autres espaces tels que les pelouses, les friches, les jardins, et les milieux aquatiques représentent moins de 3,5% du PNRG. (Figure 3).

Les milieux agricoles sont principalement présents sur les plateaux. Dans les vallées et sur les rebords de plateau, on trouve les forêts, les villages et les milieux aquatiques (rivières et marais).

C. Les Chauves-souris présentes sur le PNRG

15 espèces ont été notées sur le territoire du PNRG depuis les 10 dernières années, principalement par la technique acoustique. Un seul gîte hivernal est connu, rassemblant plusieurs centaines d'individus (du genre *Myotis*). Aucun gîte de reproduction n'est actuellement connu.

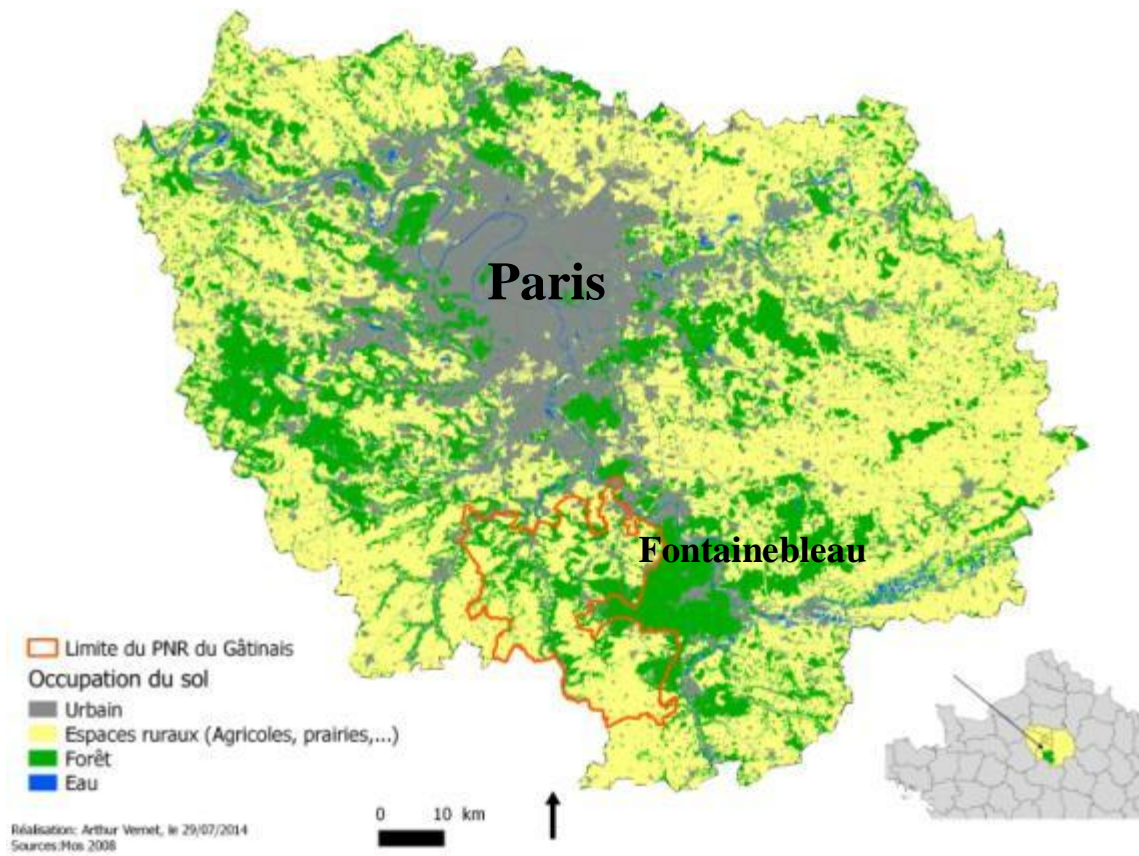


Figure 2: Localisation du Parc naturel régional du Gâtinais français (PNRG) en région Ile de France.

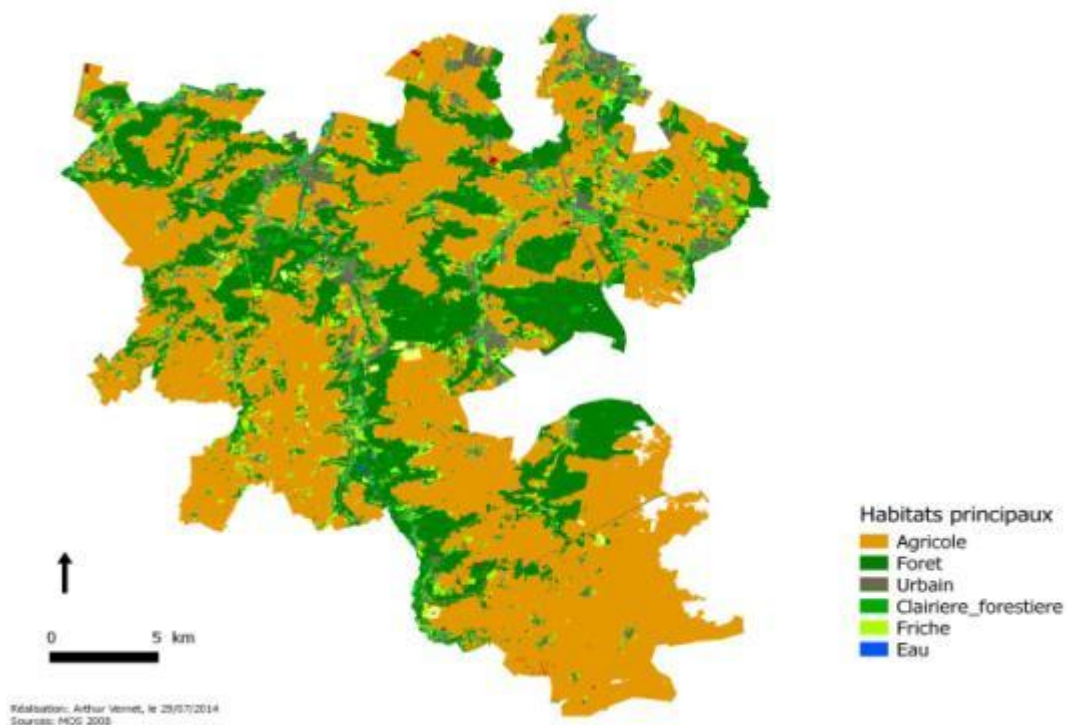


Figure 3: Les habitats principaux présents sur le PNRG.

Les espèces ou groupe d'espèces les plus communes sont étudiés pour cette étude. Ce sont les Pipistrelles (commune, Kuhl et Nathusius), la Sérotine commune et les Noctules (Leisler et commune) et enfin le groupe des Murins (*Myotis* spp).

2. Les protocoles utilisés

A. *Le protocole Vigie Chiro*

Dans l'objectif d'évaluer l'impact de la gestion de l'éclairage public (densité de lampadaires, extinction communale, halo lumineux) sur les chauves-souris, nous avons mobilisé le jeu de données constitué par le programme Vigie Chiro déployé sur le PNRG.

1. *Vigie Chiro routier*

Vigie Chiro a été initié par le MNHN en 2006 (Kerbiriou *et al.* 2006). C'est un protocole de sciences participatives qui s'inscrit dans le programme de Vigie Nature (<http://vigienature.mnhn.fr/>). Il est destiné à suivre et caractériser les tendances de populations des espèces communes de Chauves-souris en France sur le long terme. Plusieurs protocoles sont proposés aux observateurs : routier, pédestre et point fixe. Tous ces protocoles reposent sur l'écoute et l'enregistrement des ultrasons émis par les Chiroptères. Le PNRG réalise depuis 2007 le protocole routier.

Ce protocole consiste à enregistrer les ultrasons en parcourant des tronçons en voiture. Le suivi est réalisé 2 fois dans l'année : 1 passage entre le 15 juin et le 31 juillet (période de mise bas) et le 2^{ème} passage entre le 15 août et le 30 septembre (période d'émancipation des jeunes et mouvements migratoires). Un circuit routier fait 30 km et est divisé en 10 tronçons de 2 km séparés d'un inter-tronçon d'1 km. L'observateur enregistre les cris d'écholocation des chauves-souris en voiture à une vitesse de 25 km/h sur les 10 tronçons de 2 km à l'aide d'un détecteur à ultrasons (Tranquility transect ; Courtpan Design Ltd, Cheltenham,UK ou D240X ; Pettersson) et d'un enregistreur (Zoom H2 ; Samson). Afin de traiter statistiquement les résultats, chaque tronçon de 2 km est divisé en secteur de 400m chacun (Figure 4), les enregistrements sont donc rattachés à chacun de ces secteurs. L'observateur note durant son suivi la météo (température de début et fin de circuit, % de couverture nuageuse, vent, pluie). Le point de départ du circuit est tiré au sort par le MNHN dans un rayon de 10 km autour de l'habitation de l'observateur. L'itinéraire du reste du circuit est ensuite laissé à l'appréciation de l'observateur mais doit passer dans l'ensemble des milieux naturels présents autour de chez lui. Le même circuit est reproduit chaque année à la même période.

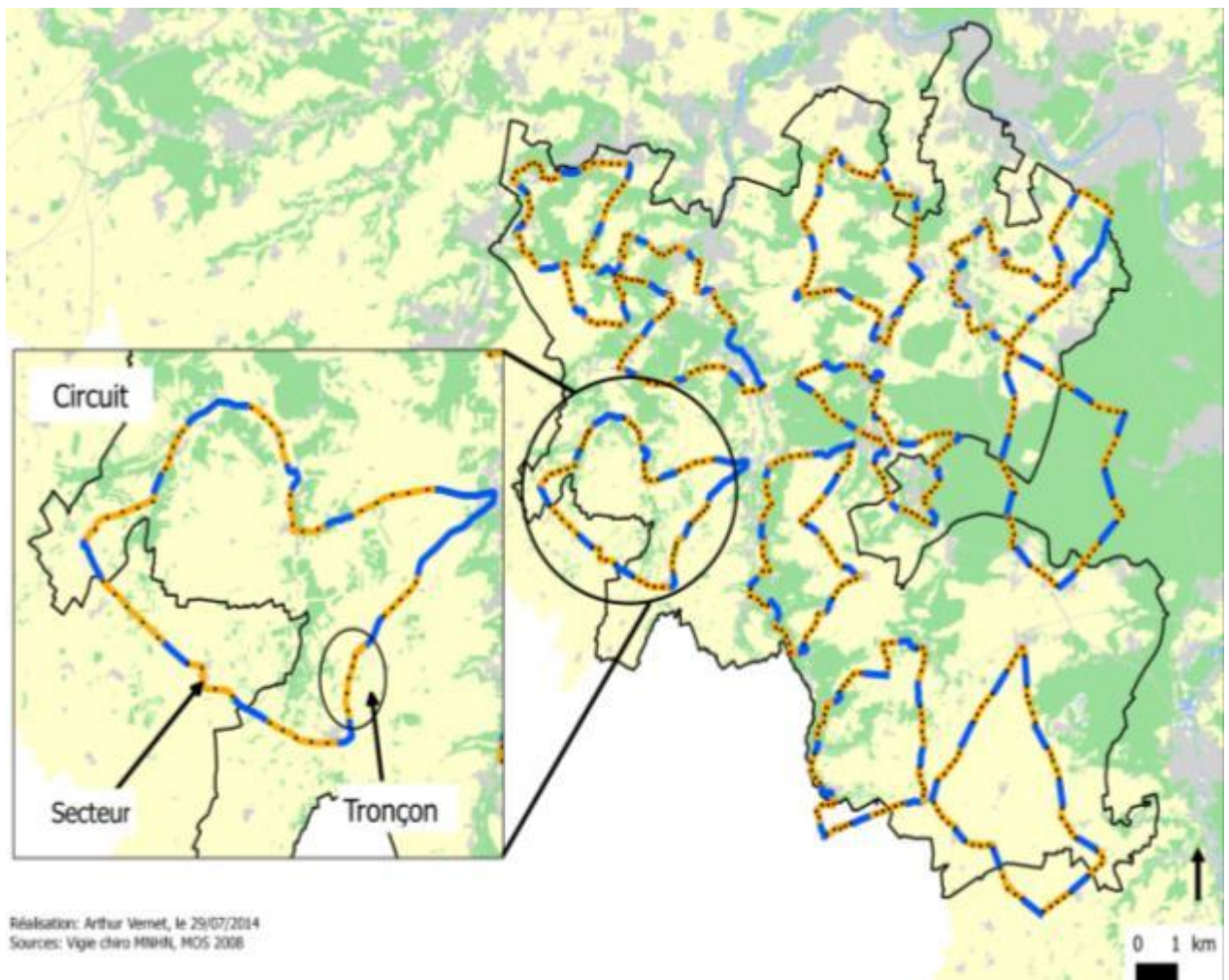


Figure 4: Les 10 circuits réalisés sur le PNRG et description d'un circuit.

2. *Les circuits du PNRG*

10 circuits sont réalisés sur le PNRG depuis 2007 (Figure 4). 8 ont été réalisés tous les ans (2007 à 2013). Les 2 autres ont été faits jusqu'en 2009, et un a été fait également en 2011 et l'autre en 2013. Ce qui fait un total de 7915 secteurs analysables. Les circuits sont répartis sur l'ensemble du PNRG et sont représentatifs de l'ensemble des milieux présents sur le territoire du PNRG (agricole, forestier, urbain), même si assez logiquement les territoires urbains sont légèrement sur représentés et les forêts sous représentées (les routes ont pour but de relier les villages et évitent autant que possible les espaces forestiers), (Tableau 1).

B. Le protocole Point Fixe

Pour évaluer à une échelle plus fine - celle du lampadaire - l'effet de la lumière et celui de l'extinction du lampadaire au cours de la nuit sur les Chiroptères, nous avons mis en œuvre un protocole spécifique. L'étude consiste à enregistrer simultanément pendant une nuit complète les ultrasons des Chauves-souris à la fois sous un lampadaire et dans un site "noir", c'est-à-dire sans lumière mais dans un milieu naturel similaire (même proportion d'habitats entre les deux sites ; Annexe 1). Cet appariement permet d'éviter une corrélation entre le régime lumineux et certains types d'habitats, comme la proportion d'espaces urbains. D'autre part le site "noir" était situé à proximité du site éclairé afin d'échantillonner les mêmes populations de Chauve-souris, (Figure 5). Cet appariement soigneusement choisi permet d'éviter des biais liés à la météo, à la date, à la géographie et aux habitats et ainsi de tester seulement l'effet de la lumière. Afin d'étudier l'effet de l'extinction, le site éclairé est positionné soit sous un lampadaire qui s'éteint au cours de la nuit soit sous un lampadaire éclairé toute la nuit. L'enregistrement se fait avec un SM2 Bat+ (Wildlife Acoustics) relié à un micro (SMX-US) par un câble de 3 mètres. 2 SM2 Bat+ ont donc été nécessaires pour cette étude.

L'étude s'est déroulée principalement en 2014 de début mai à début juillet. D'autres enregistrements avaient été réalisés sur quelques paires (Site éclairé/ Site noir) à la même période en 2013. Les paires ont été placées dans des milieux forestiers, agricoles (haies, lisières forestières), et aquatiques (rivière) et à chaque fois dans des bonnes conditions météorologiques et à des moments où la lune est peu visible. Ce sont au total 33 paires qui ont été enregistrées. 19 l'ont été dans des communes qui pratiquent l'extinction de son éclairage public et les 14 autres paires ont été placées dans des communes qui ne la pratiquent pas, (Figure 6).

Tableau 1: Proportion des habitats principaux présents sur le PNRG pour chaque circuit et comparaison avec le territoire du PNRG.

N° Circuit	% Agricole	% Forêt	% Urbain	Années de suivi
7	84,8	1,2	9,6	2007 à 2009 et 2013
14	17,5	60,7	13,1	2007 à 2009 et 2011
80	22,7	38,9	25,3	2007 à 2013
81	73,8	8	8,1	2007 à 2013
82	52,9	23,1	10,6	2007 à 2013
83	35,5	31,1	15,1	2007 à 2013
84	57,9	12,2	13,1	2007 à 2013
85	38,6	26,2	18,2	2007 à 2013
86	38,0	36,1	9,8	2007 à 2013
87	51,6	24,4	12	2007 à 2013
Proportion moyenne des types d'habitats de l'ensemble des circuits	47,4	26,1	13,6	
Proportion moyenne des types d'habitats présents sur le territoire du PNRG	58	31	7,5	

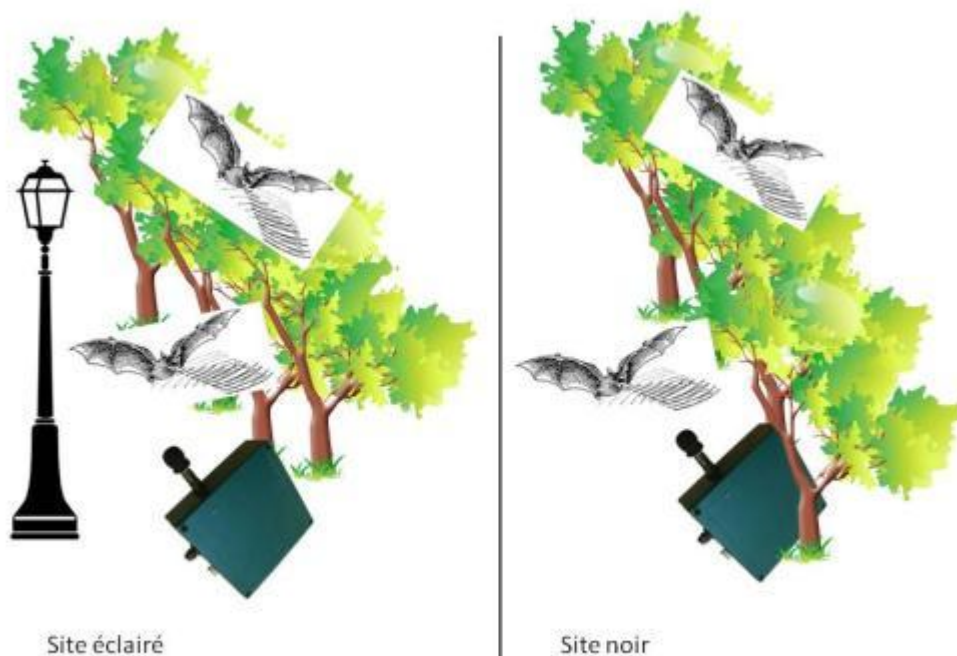


Figure 5: Dispositif expérimental du protocole Point Fixe, site éclairé avec lampadaire et site noir sans lampadaire. Les 2 sites sont situés dans un même milieu.

3. L'Analyse acoustique

A. *Principes*

Chaque espèce de Chauves-souris émet des cris d'écholocation qui sont propres à sa taille et à sa stratégie d'alimentation (Barataud, 2012). Afin de déterminer l'espèce ayant émis les écholocations enregistrées, les enregistrements sont analysés à l'aide d'un logiciel qui affiche le son sous la forme d'un sonagramme (Annexe 2). Il est ainsi possible d'identifier certaines espèces mais d'autres sont difficiles à différencier du fait d'un fort recouvrement des critères, les critères d'identification sont loin d'être stabilisés et c'est un domaine en pleine évolution (Barataud, 2012). Nous avons donc dû regrouper certaines espèces proches au niveau de l'écholocation et de leurs stratégies d'alimentation (Barataud, 2012). Ainsi, pour le genre *Myotis*, nous sommes restés au genre ; nous avons regroupé les sérotines communes et les 2 espèces de noctules (commune et Leisler) en un complexe appelé "Sérotule" et nous avons regroupé les pipistrelles de Kuhl et de Nathusius. Seule la pipistrelle commune a été identifiée à l'espèce.

Selon le matériel d'enregistrement utilisé, les cris peuvent être enregistrés soit en direct, soit en expansion de temps. « *L'expansion de temps* » est une technique qui permet de diviser la fréquence des écholocations détectées par le détecteur par un facteur 10, ainsi un cri de sérotine émis à 28kHz et donc inaudible pour l'oreille humaine sera transformé en un cri audible à 2,8 kHz. Cette technique permet d'écouter directement sur le terrain. *Le direct* » consiste à capter directement les ultrasons avec une large bande passante de fréquence (ici compte tenu des enregistreurs numériques utilisés, la fréquence maximale est de 48kHz), il est alors nécessaire d'avoir recours à un ordinateur pour visualiser les cris émis par les chauves-souris. Cette technique, contrairement à l'expansion de temps, permet d'enregistrer toutes les écholocations, même les très faibles (sans seuil de détection). Les 2 techniques sont utilisées et chacune a ses avantages et ses inconvénients.

B. *Analyse des enregistrements Vigie Chiro*

Pour chaque tronçon de 2 km enregistré un fichier son est obtenu. Chaque fichier est analysé avec le logiciel Syrinx. L'observateur passe en revue toute la bande enregistrée sur le sonagramme et détermine à chaque cri l'espèce ou le groupe d'espèces correspondant. A chaque fois qu'il voit une séquence de cris d'une espèce, il note le temps du début et de la fin de la séquence. Cela correspond à un contact. On a donc pour chaque secteur de 400 m, le nombre de contacts par espèce et cela pour chaque suivi. Ce nombre de contact est utilisé comme un indice d'activité d'une espèce sur le site échantillonné. Au début du suivi Vigie Chiro (en 2007), seule l'expansion était utilisée, depuis 2009 le direct et l'expansion sont

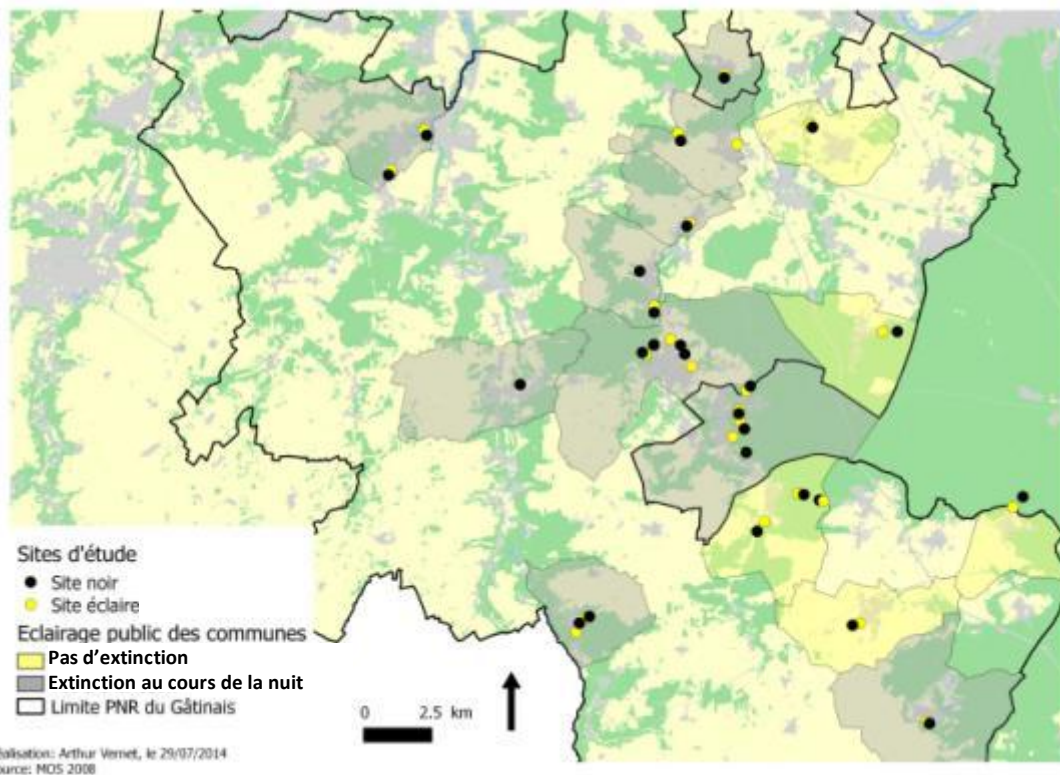


Figure 6: Position des 33 sites appariés (Eclairés/ Noirs) sélectionnés pour le protocole Point Fixe sur le territoire du PNRG

analysés. Ces dernières années seul le direct est analysé car plus performant en détection de cris et pour l'identification. Cet effet **méthode** (expansion ou direct) est pris en compte dans les analyses statistiques.

C. *Analyses des enregistrements du protocole Point Fixe*

Les enregistrements faits avec le SM2 sont analysables seulement en expansion de temps. Le SM2 crée des fichiers sons de 5 secondes. On attribue ces 5 secondes comme un passage de Chiroptère devant le SM2, on le définit comme un contact, (Barataud, 2012 ; Hacquart, 2013). Des milliers de fichiers sons peuvent être créés chaque nuit. Pour faciliter l'analyse nous avons utilisé un logiciel de détermination automatique (SonoChiro ; Biotope). Cela permet de faire un énorme tri et de conserver seulement les fichiers sons qui contiennent des cris de Chauves-souris. De plus le logiciel attribue pour chaque fichier son un nom d'espèce avec une probabilité d'erreur. Une vérification est ensuite nécessaire afin de corriger les erreurs du logiciel sur un logiciel d'analyse de sonagrammes comme Syrinx. Pour chaque nuit nous avons donc un nombre de contacts (fichier son de 5 secondes) pour chaque espèce et pour chaque site (éclairé ou noir).

4. Présentation des variables explicatives

Pour chaque secteur et site apparié, des buffers de 200 m et de 100 m de rayon ont été respectivement créés sous SIG. Qgis 2.2.

A. *Les variables de lumière*

6 variables sont utilisées pour étudier la lumière et la gestion de l'éclairage : la **lumière moyenne par secteur**, **l'extinction à l'échelle de la commune**, **l'extinction pendant le suivi Vigie Chiro**, **le régime lumineux**, **le nombre d'années depuis la décision d'extinction prise par la commune**, **le nombre de lampadaires par secteur**, (Tableau 2).

B. *Les variables habitats et météorologiques*

La proportion de surface d'habitat a été calculée à partir du MOS 2008 (Moyen d'occupation du sol ; <http://www.iau-idf.fr/>) pour chaque buffer. Le MOS est la cartographie de l'occupation du sol réalisée sur l'ensemble de la région Ile de France. Des regroupements d'habitats ont été faits (Tableau 2) : **milieux forestiers** ; **milieux agricoles** ; **milieux ouverts non agricole** ; **milieux urbains**.

Une **distance à l'eau** a également été mesurée pour chaque secteur et chaque site apparié à partir de la couche EAU de l'IGN (2013), (<http://www.ign.fr/>), (Tableau 2). Le calcul a été fait avec l'outil distance de MapInfo 8.5. Cela correspond à la distance minimale entre chaque

Tableau 2 : Présentation des 19 variables utilisées pour les 2 analyses avec leur description, leur définition statistique et pour quel protocole elles sont utilisées.

Variable	Description	Type de variable	Pour quel protocole?
Lumière moyenne	Lumière moyenne (en nano Watt) par secteur, calculée à partir du raster de la NASA 2012. (http://ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_viirs_nrl.html), (Figure1). Transformée en Log.	Continue	Vigie Chiro
Extinction	On note pour chaque secteur de chaque année si la commune pratique ou non l' extinction de son éclairage public. (Données du PNRG). 0 : pas d'extinction (4642 secteurs); 1 : extinction (3273 secteurs).	Facteur	Vigie Chiro
Régime lumineux	Régime lumineux pour chaque site apparié, le SM2 est soit dans un site noir (0); sous un lampadaire avec extinction (1), sous un lampadaire éclairé en continue (2).	Facteur	Protocole Point Fixe
Extinction circuit	Extinction pendant le circuit , durant l'enregistrement les secteurs peuvent être soit: Eclairés (0) (3167 secteurs). Avec lampadaires éteints (1), (193 secteurs). Dans le noir sans présence de lampadaires (2), (4555 secteurs).	Facteur	Vigie Chiro
Nombre de lampadaire	Le nombre de lampadaires pour chaque buffer de chaque secteur	Continue	Vigie Chiro
Nombre d'années après extinction	Pour chaque secteur et pour chaque année, on note le nombre d'années d'extinction depuis sa mise en place effective sur la commune	Continue	Vigie Chiro
forêt	Milieux forestiers : forêts de feuillus, de conifères et mixte et aux clairières forestières. Proportion de surface de chaque buffer. MOS 2008	Continue	Vigie Chiro et Protocole Point Fixe
agri	Milieux agricoles : grandes cultures, maraîchages, serres et vergers. Proportion de surface de chaque buffer. MOS 2008	Continue	Vigie Chiro et Protocole Point Fixe
mil_ouv	Milieux ouverts non agricoles : friches, parcs et jardins et prairies. Proportion de surface de chaque buffer. MOS 2008	Continue	Vigie Chiro et Protocole Point Fixe
urbain	Milieux urbains : ensemble du bâti et carrières. Proportion de surface de chaque buffer. MOS 2008	Continue	Vigie Chiro et Protocole Point Fixe
dist_eau	Distance à l'eau . Transformée en Log. IGN 2013	Continue	Vigie Chiro et Protocole Point Fixe
Temp	Température au cours du circuit (vigie chiro) et température moyenne au cours de la nuit (protocole Point Fixe). En degrés Celsius	Continue	Vigie Chiro et Protocole Point Fixe
vent	Vent au moment des enregistrements. 0 : nul; 1 : faible; 2 : moyen	Continue	Vigie Chiro et Protocole Point Fixe
nuage	Couverture nuageuse au moment des enregistrements. 1 : 0-25%; 2 : 25-50%; 3 : + de 50%	Continue	Vigie Chiro et Protocole Point Fixe
pluie	Pluie (en mm) au moment des enregistrements	Continue	Vigie Chiro et Protocole Point Fixe
Lune	Lune visible (1) ou non au moment de l'enregistrement (Vigie chiro). Pourcentage de lune visible au moment des enregistrements (Protocole Point Fixe).	Facteur / Continue	Vigie Chiro et Protocole Point Fixe
Date	En jours julien depuis le 1er janvier de chaque année	Continue	Vigie Chiro et Protocole Point Fixe
Année	Année de réalisation de chaque circuit	Continue	Vigie Chiro
Méthode	Expansion ou direct	Facteur	Vigie chiro

centroïde de buffer et le point d'eau le plus proche. Cette distance à l'eau a été transformée en Log afin d'avoir une répartition plus uniforme de cette variable.

Pour les 2 protocoles, des variables météo (**Température**, **Couverture nuageuse**, **Pluie**, **Vent**), de date et d'information sur la lune ont été relevées (Tableau 2).

5. Analyses statistiques

A. *Principes*

L'objectif de cette étude est de déterminer dans quelle mesure les variables liées à la lumière jouent sur l'abondance, la présence et la tendance des populations de différentes espèces ou groupes d'espèces de Chauves-souris dans le PNRG (dans notre étude : Pipistrelle commune, les groupes "Pipistrelle Kuhl/Nathusius" ; "Sérotule" et "Myotis"). Pour cela, l'analyse par modèle linéaire semble appropriée, car nous recherchons la part d'explication de chacune de nos variables explicatives sur la variable réponse qui correspond aux données de Chauves-souris. Cependant, au vu de la distribution non normale de nos variables réponses (Figure 7), le modèle linéaire généralisé (GLM) avec une distribution de Poisson, Négative Binomiale ou Binomiale est beaucoup plus approprié pour des données de comptage sans valeurs négatives et avec un nombre important de zéros (Zuur *et al.* 2009). Enfin, on peut voir que les données sont structurées ou emboîtées pour les deux protocoles. Il y a donc un manque d'indépendance entre les données. Il est nécessaire de prendre en compte ces effets, appelés "aléatoires", cela nécessite d'utiliser des modèles linéaires généralisés à effets mixtes, (Zuur *et al.* 2009). Le package glmmADMB est utilisé sous R 3.1 pour effectuer ce type de modèle. Une validation a posteriori des modèles est effectuée en inspectant les résidus (normalité, homoscedasticité, indépendance).

Avant d'effectuer ces modèles il est nécessaire d'évaluer d'éventuels problèmes de colinéarité des variables explicatives. Notons que dès le plan d'échantillonnage (Annexe 1) nous avons porté une grande importance à ce que nos variables explicatives ne soient pas confondues comme par exemple (effet éclairage et habitat). La corrélation des variables continues a été évaluée deux à deux à l'aide d'un test de corrélation de Spearman, alors que celle entre variable qualitative et quantitative a été évaluée via des tests de Kruskal. Ces analyses préliminaires permettent de sélectionner les variables à conserver dans le modèle. Au final, une évaluation globale de la colinéarité du modèle a été réalisée à l'aide de la fonction «corVIF» (Zuur *et al.* 2009). Les valeurs de «corVIF» pour chaque variable doivent être inférieures à 3 et avoir une moyenne inférieure à 2. Dans un modèle linéaire, les variables explicatives doivent être indépendantes (Zuur *et al.* 2009). Cette étude des corrélations permet

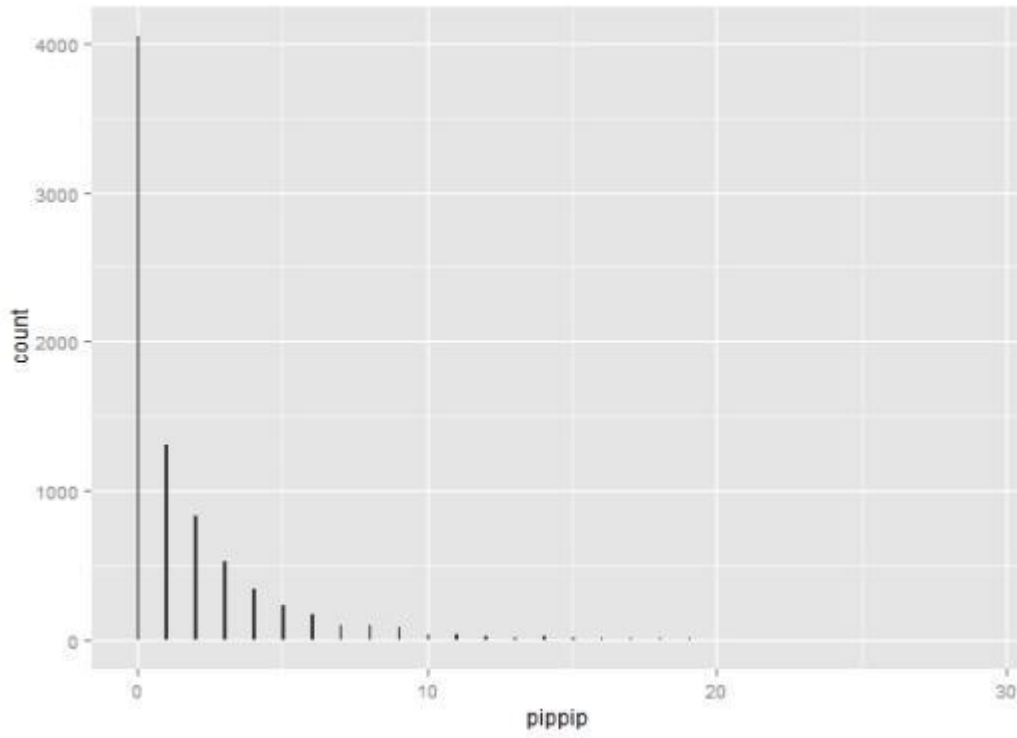


Figure 7: Exemple d'une des distributions d'une variable réponse (ici la pipistrelle commune avec le protocole Vigie Chiro)

donc de sélectionner les variables à mettre dans nos modèles. A cause de certaines colinéarités entre variables liées à la lumière, nous avons dû effectuer plusieurs modèles différents.

B. Gestion de l'éclairage public (Analyses Vigie Chiro)

4 modèles ont été réalisés pour chaque espèce ou groupe d'espèces (Tableau 3) afin d'analyser la part d'explication (pourcentage de variance expliquée) de chaque variable liée à la lumière (extinction, extinction pendant le circuit, lumière moyenne et nombre de lampadaires) sur la variable réponse (Tableau 3). Les valeurs de « corVIF » des variables explicatives utilisées sont toutes inférieures à 3 (Annexe 3).

La distribution de l'abondance par secteurs de la pipistrelle commune montre qu'elle correspond plutôt à une loi de Poisson (Figure 7), cependant les résultats ont montré qu'il y avait une trop forte "overdispersion" (lorsque la variance est supérieure à la moyenne) à cause d'un nombre important de zéros. Une loi négative binomiale permet de mieux prendre en compte cette "overdispersion" (Crawley, 2009 ; Faraway, 2006) (Tableau XX). Pour les 3 autres groupes d'espèces, le trop peu de données a dû nous contraindre à passer en présence/absence pour chaque secteur plutôt qu'en abondance. Une loi Binomiale a donc été utilisée (Tableau 3).

Un effet aléatoire est mis à l'échelle du circuit. La sélection descendante du modèle à partir du modèle le plus complet possible (variables explicatives non corrélées) s'est faite manuellement en éliminant une à une les variables avec les p-values les moins significatives. Le modèle avec l'Akaike Information Criterion (AIC) la plus faible a été conservé (Akaike, 1973). Les résultats du modèle sont obtenus en faisant un "summary" et une "Anova" de type II. Par souci de compréhension, de comparaison et de communication, chaque modèle final a les mêmes variables explicatives mêmes si certaines ne sont pas significatives au seuil de 0,05%.

C. Effet de l'extinction (Analyses protocole Point Fixe)

Un modèle pour chaque espèce a été réalisé afin de tester l'effet de l'extinction au cours de la nuit (Tableau 4). La somme du nombre de contact par nuit pour chaque groupe d'espèce a été utilisée comme variable réponse dans cette analyse. Les valeurs de « corVIF » des variables explicatives utilisées sont toutes inférieures à 3 (Annexe 3). Nous utilisons des données d'abondance, une loi de Poisson peut être utilisée car il n'y a pas d'overdispersion. Des effets aléatoires emboîtés ont été mis dans le modèle : paires des sites (éclairé et noir) emboîtées dans les communes pour prendre en compte le fait que des paires situées dans une même commune peuvent avoir des enregistrements plus similaires que des paires plus éloignées. La

Tableau 3: Modèles utilisés pour l'analyse Vigie Chiro

Espèce ou groupe d'espèces	Variable lumière testée	Autres variables explicatives utilisées	Effet aléatoire	Loi statistique utilisée
Pipistrelle commune	Extinction	Habitats (forêt, mil_ouv, urbain, dist_eau) + Météo (Temp, nuage, vent) Date + Année + Méthode	circuit	Négative Binomiale
	Lumière moyenne			
	Nombre lampadaires	Habitats (forêt, mil_ouv, log distance à l'eau) + Météo (Temp, nuage, vent) Date + Année + Méthode	circuit	
Pipistrelle de Nathusius / Kuhl ; Sérotules ; Myotis spp	Extinction	Habitats (forêt, mil_ouv, urbain, dist_eau) + Météo (Temp, nuage, vent) Date + Année + Méthode	circuit	Binomiale
	Lumière moyenne			
	Nombre lampadaires	Habitats (forêt, mil_ouv, log distance à l'eau) + Météo (Temp, nuage, vent) Date + Année + Méthode	circuit	
	Extinction circuit			

Tableau 4: Modèles utilisés pour l'analyse avec le protocole Point Fixe

Espèce ou groupe d'espèces	Variables explicatives utilisées	Effets aléatoires	Loi statistique utilisée
Pipistrelle commune			
Pipistrelle de Nathusius/ Kuhl	Régime lumineux+variables habitats	Commune/paire	Poisson
Sérotules	(foret+urbain+mil_ouv+dist_eau) + variables météo		
Myotis spp	(Temp+Lune)		

sélection descendante du modèle est réalisée avec la fonction `drop1(m, test= "Chisq")` du package "stats", afin d'avoir le modèle avec la meilleure AIC (Zuur *et al.*, 2009).

D. Effet de l'extinction sur les tendances de population du Gâtinais

Deux GLM mixtes pour chaque espèce sont réalisés (Tableau 5) afin de tester l'effet de l'extinction à l'échelle communale sur les tendances de populations et du nombre d'années après extinction. Les valeurs de « corVIF » des variables explicatives utilisées sont toutes inférieures à 3 (Annexe 3). Les lois choisies sont les mêmes que celles utilisées pour la première analyse (voir 5.A et Tableau 5). Une interaction est effectuée entre la variable année (en numérique) et l'extinction (facteur) afin de voir l'effet de l'extinction sur la tendance de chaque population. Un effet aléatoire a été mis sur le secteur afin de pouvoir faire une analyse comparant l'activité du secteur année par année. La sélection du meilleur modèle est identique aux autres analyses. Par souci de compréhension, de comparaison et de communication, chaque modèle final a les mêmes variables explicatives mêmes si certaines ne sont pas significatives. Enfin il faut noter que pour cette partie, seul le passage 1 a été analysé car il correspond à la période de mise et d'élevage des jeunes. Cela permet de mesurer la tendance sur les populations locales évitant ainsi des individus migrateurs. Un GAM pour chaque espèce a été réalisé pour visualiser graphiquement les tendances.

Résultats

1. Analyse Vigie Chiro, effets de la gestion de l'éclairage public

A. Données récoltées

De 2007 à 2013, 93 passages ont été réalisés sur les 10 circuits du PNRG. Au total 15 232 contacts de Chiroptères ont été enregistrés. Le tableau 5 montre le nombre de contacts par espèce ainsi que le nombre de secteurs positifs par espèce. La pipistrelle commune est l'espèce la plus contactée et représente 80% des contacts obtenus (Tableau 6). Les trois autres groupes d'espèces représentent moins de 20% des contacts obtenus (Tableau 6).

B. Résultats pour les variables habitats et météorologiques

Les variables habitats et météo expliquent de manière importante l'activité et la présence des Chiroptères. Chaque espèce réagit positivement et significativement aux milieux forestiers, aux milieux urbains et aux milieux ouverts (Tableau 7). Concernant la distance à l'eau, plus la distance est faible plus l'activité ou la présence est élevée pour les pipistrelles communes, *Myotis spp* et *Sérotules* (Tableau 7). Par contre nous n'avons pas détecté d'effet de cette variable sur l'activité du groupe pipistrelle *Nathusius/Kuhl*. La température a un effet positif

Tableau 5: Modèles utilisés pour l'analyse de l'effet de l'extinction sur les tendances de population du PNRG

Espèce ou groupe d'espèces	Variables explicatives utilisées	Effet aléatoire	Loi statistique utilisée
Pipistrelle commune	ANNEE * Extinction +habitats (foret + urbain + mil-ouv + dist_eau) + Météo (Date + Temp + vent + Heure) + Methode	secteur	Négative Binomiale
	Nombre d'années après extinction + habitats (foret + urbain + mil-ouv + dist_eau) + Météo (Date + Temp + vent + Heure) + Methode		
Pipistrelle de Nathusius / Kuhl ; Sérotules ; Myotis spp	ANNEE * Extinction +habitats (foret + urbain + mil-ouv + dist_eau) + Météo (Date + Temp + vent + Heure) + Methode	secteur	Binomiale
	Nombre d'années après extinction + habitats (foret + urbain + mil-ouv + dist_eau) + Météo (Date + Temp + vent + Heure) + Methode		

Tableau 6: Nombre de contacts et de secteurs avec présence pour chaque espèce avec l'étude Vigie Chiro

Espèce ou groupe d'espèce	Nombre de contacts	Pourcentage du nombre de contacts	Nombre de secteurs positifs sur 7915
Pipistrelle commune	12107	79,5	3828
Sérotule	2571	16,9	1156
Pipistrelle Nathusius/Kuhl	397	2,6	285
Myotis spp	157	1	140
Total	15232	100	

Tableau 7: Effet de chaque type d'habitat sur l'activité de chaque espèce (avec Estimate, Standard Error et indice de significativité). ns : non significatif ; * : p-value<0,05 ; ** : p-value<0,01 ; * : p-value<0,001.**

Espèce ou groupe d'espèce	Milieux forestiers	Milieux urbains	Friches et jardins	Distance à l'eau
Pipistrelle commune	0.008 ± 0.0007 ***	0.01 ± 0.001 ***	0.007 ± 0.001 ***	-0.15 ± 0.02 ***
Pipistrelle Nathusius/Kuhl	0.005 ± 0.0023 *	0.01 ± 0.004 **	0.01 ± 0.005 *	0.01 ± 0.062 ns
Sérotule	0.006 ± 0.001 ***	0.01 ± 0.002 ***	0.006 ± 0.003 *	-0.09 ± 0.03 **
Myotis spp	0.009 ± 0.003 **	0.01 ± 0.005 *	0.013 ± 0.006 *	-0.16 ± 0.072 *

Tableau 8: Effet des variables "Nombre de lampadaires" et "Lumière moyenne" sur l'activité de chaque espèce (avec Estimate, Standard Error et indice de significativité) .ns : non significatif ; * : p-value<0,05 ; ** : p-value<0,01 ; * : p-value<0,001.**

Espèce ou groupe d'espèce	Nb de lampadaires	Lumière moyenne
Pipistrelle commune	0,02 ± 0,0032 ***	-0,33 ± 0,057 ***
Pipistrelle Nathusius/Kuhl	0,017 ± 0,01 .	-0,062 ± 0,18 ns
Sérotule	0,03 ± 0,005 ***	-0,17 ± 0,1 ns
Myotis spp	-0,064 ± 0,24 ns	-0,017 ± 0,015 ns

significatif sur l'activité de la pipistrelle commune (0.043 ± 0.007 ; $p\text{-value} \leq 0,001$) et le groupe des Sérotules (0.11 ± 0.013 ; $p\text{-value} \leq 0,001$) mais n'apparaît pas significatif pour les autres groupes d'espèces.

Pour les 4 groupes d'espèces l'expansion de temps détecte significativement moins de cris de chauves-souris que la technique du direct.

C. Résultats pour la lumière moyenne par secteur

La lumière moyenne par secteur a un effet négatif sur l'activité de la pipistrelle commune ($-0,33 \pm 0,06$; $p\text{-value} \leq 0,001$). La Figure 8 montre que cet effet n'est pas linéaire, l'activité de cette espèce est faible dans les valeurs très faibles de lumière puis augmente assez rapidement jusqu'à des valeurs de 0,5 nano-Watts (1,6 sans le Log, quand on retransforme) pour ensuite diminuer (Figure 8). Aucun effet significatif n'est détecté pour les autres espèces même si le sens de la relation est le même qu'observé pour la pipistrelle commune (Tableau 8).

D. Résultats pour le nombre de lampadaires

Pour la pipistrelle commune (0.02 ± 0.003 ; $p\text{-value} \leq 0,001$), l'augmentation du nombre de lampadaires a un effet positif sur l'activité de cette espèce. Pour les Sérotules (0.03 ± 0.005 ; $p\text{-value} \leq 0,001$) plus il y a de lampadaires par secteur plus il y a de secteurs de présence pour ce groupe (Tableau 8). Pour les autres groupes d'espèces aucun effet significatif n'est détecté.

E. Résultats pour l'extinction à l'échelle communale

A l'échelle communale, seul le groupe des pipistrelles de Nathusius/Kuhl ($0,28 \pm 0,14$; $p\text{-value} = 0.049$) réagit positivement à l'extinction de l'éclairage public. Il y a plus de secteurs de présence de ce groupe dans les communes qui pratiquent l'extinction (Figure 9). Pour les autres espèces, aucun effet n'est détecté (Figure 9).

F. Résultats pour l'extinction durant le circuit

Dans un premier temps, on compare les secteurs "noirs", sans présence de lampadaire avec les secteurs avec lampadaires allumés. Pour la pipistrelle commune il y a moins d'activité dans les secteurs "noirs" que dans les secteurs avec présence de lampadaires allumés ($-0,49 \pm 0,045$; $p\text{-value} \leq 0,001$), (Figure 10). Le même effet est observé chez les Sérotules ($-0,61 \pm 0,081$; $p\text{-value} \leq 0,001$) et les pipistrelles de Nathusius/Kuhl ($-0,47 \pm 0,15$; $p\text{-value} = 0.002$) : dans les secteurs "noirs" il y a moins de secteurs de présence de ces 2 groupes comparés aux secteurs avec lampadaires allumés (Figure 10). Aucun effet n'est détecté pour les Myotis spp. Dans un second temps, on compare les secteurs avec lampadaires allumés et les secteurs avec lampadaires éteints. Pour la pipistrelle commune il y a plus d'activité dans les secteurs avec lampadaires éteints que dans les secteurs avec lampadaires allumés ($0,32 \pm 0,11$; $p\text{-value} = 0.006$), (Figure 9). Pour le groupe des pipistrelles de Nathusius/Kuhl, on retrouve le

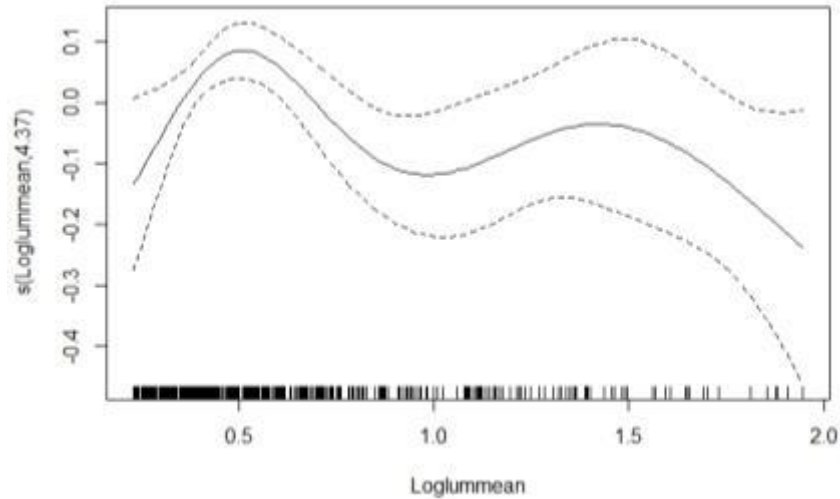


Figure 8 : L'activité de la pipistrelle commune en fonction du Log de la lumière moyenne par secteur.

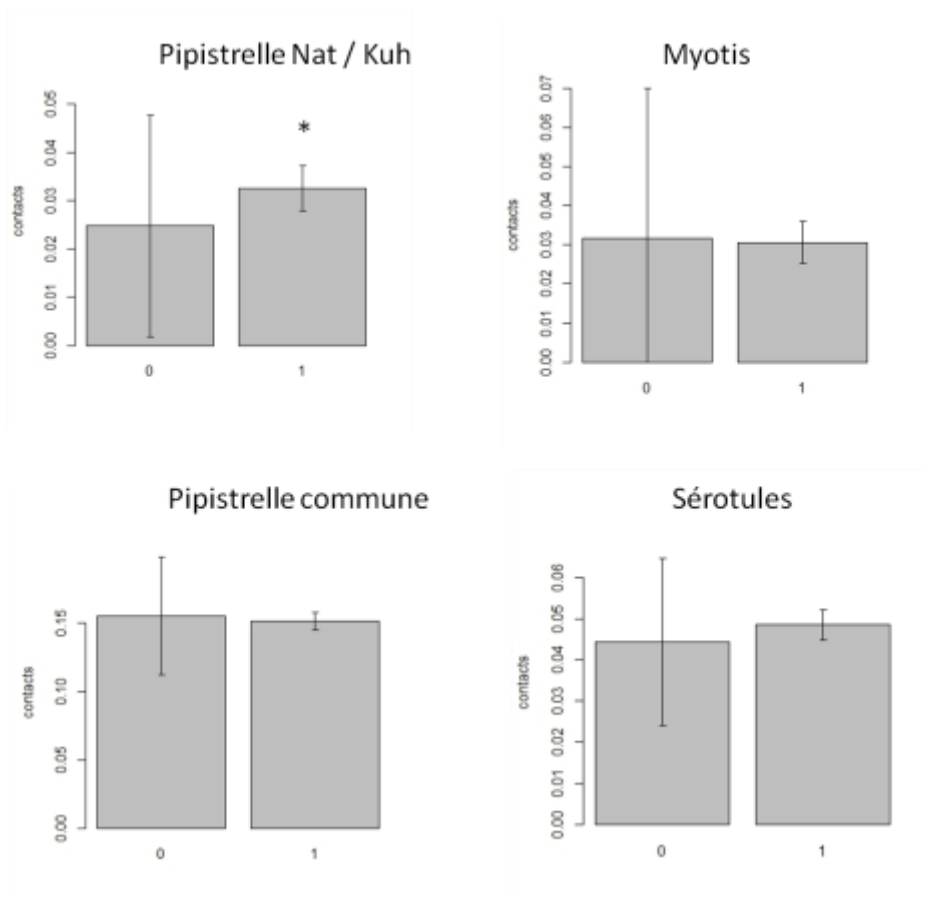


Figure 9: Barplot des estimates avec écart type présentant pour chaque espèce l'effet de l'extinction, (0: secteurs sans extinction; 1: secteurs avec extinction). Les étoiles (*) représentent la significativité des résultats (* : p-value<0,05 ; ** : p-value<0,01 ; *** : p-value<0,001).

même effet : il y a plus de secteurs de présence de ce groupe dans les secteurs avec lampadaires éteints que dans les secteurs avec lampadaires allumés ($1,05 \pm 0,27$; $p\text{-value} < 0,001$), (Figure 10). Aucun effet n'est détecté pour les *Myotis* spp et les *Sérotules*.

2. Analyse du protocole Point Fixe, l'effet de l'extinction

A. *Données récoltées*

Sur les 66 sites éclairés/non éclairés échantillonnés, 55043 contacts des espèces étudiées ont été enregistrés. L'espèce la plus contactée est la pipistrelle commune avec plus de 83% des contacts (Tableau 9). Les trois autres groupes d'espèces représentent moins de 20% des contacts obtenus (Tableau 9).

B. *Résultats pour la Pipistrelle commune*

L'activité de chasse des pipistrelles communes est plus importante sur les sites éclairés toute la nuit (1.4 ± 0.02 ; $p\text{-value} < 0,001$) ou sur les sites avec extinction (0.4 ± 0.01734 ; $p\text{-value} < 0,001$) par rapport aux sites "noirs" (Figure 11)

C. *Résultats pour les Pipistrelles de Nathusius / Kuhl*

L'activité de chasse de ce groupe est plus importante dans les sites lumineux que dans les sites "noirs". Cette activité est plus importante dans les sites avec extinction au cours de la nuit (0.9 ± 0.17 ; $p\text{-value} < 0,001$) que dans les sites éclairés continuellement (0.57 ± 0.09 ; $p\text{-value} < 0,001$), (Figure 11).

D. *Résultats pour les Sérotules*

L'activité des *Sérotules* est plus faible dans les sites avec extinction que dans les sites "noirs" (-1.0494 ± 0.08 ; $p\text{-value} = 2e-16$), alors qu'elle est beaucoup plus importante dans les sites éclairés continuellement par rapport à des sites "noirs" (1.9 ± 0.067 ; $p\text{-value} = 2e-16$) (Figure 11).

E. *Résultats pour les Myotis*

L'activité des *Myotis* spp est plus faible dans les sites éclairés continuellement que dans les sites "noirs" (-1.94 ± 0.24 ; $p\text{-value} = 8.85e-16$). Par contre, il n'y a pas d'effet significatif entre les sites avec extinction et les sites "noirs" (0.045 ± 0.12 ; $p\text{-value} = 0.71$), (Figure 11).

3. Analyse de l'effet de l'extinction sur les tendances de populations du PNRG du Gâtinais

Il n'y a pas de tendance significative pour la population de Pipistrelle commune entre 2007 et 2013 sur le PNRG (Tableau 10). On peut noter toutefois une diminution forte en 2009 et une augmentation depuis 2010 (Figure 12). Il n'y a pas d'interaction avec les pratiques d'extinction des communes. Par contre, on remarque que plus le nombre d'années

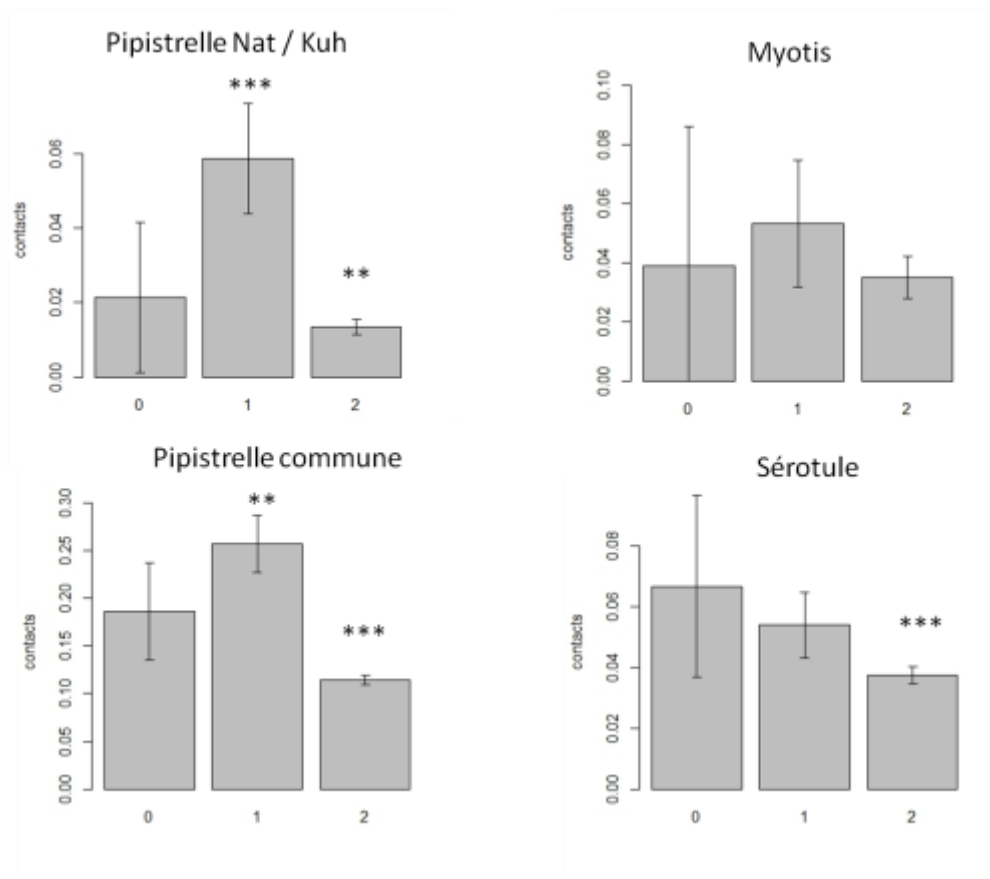


Figure 10: Barplot des estimates avec écart type présentant pour chaque espèce l'effet de l'extinction pendant le circuit (éclairés (0), avec lampadaires éteints (1) ou dans le noir sans présence de lampadaires (2)). Les étoiles (*) représentent la significativité des résultats : (* : p-value<0,05 ; ** : p-value<0,01 ; *** : p-value<0,001).

Tableau 9: Nombre de contacts enregistrés pour chaque espèce avec le protocole Point Fixe

Espèce/ groupe d'espèce	Nombre total de contacts	%
Pipistrelle commune	46 132	83.8
Sérotule	5 230	9.5
Pipistrelle Nathusius/Kuhl	2 266	4.1
Myotis spp	1 415	2.6
TOTAL	55 043	100

d'extinction pour un secteur augmente, moins il est fréquenté par cette espèce (-0.021 ± 0.006 ; $p\text{-value} < 0,001$), (Tableau 10). Pour le groupe des Sérotules, une tendance des populations à la baisse est détectée (-0.137 ± 0.0421 ; $p\text{-value} = 0.0011$) (Figure 12). Comme pour ce groupe d'espèce les analyses ont été réalisées en présence/absence, depuis 2007 il y a donc moins de secteurs dans lesquels ce groupe d'espèce est détecté. Concernant l'extinction, les analyses semblent montrer une tendance à la baisse non significative du nombre de secteurs de présences, plus importantes dans les communes qui pratiquent l'extinction que dans celles qui ne la pratiquent pas (0.092 ± 0.05 ; $p\text{-value} = 0,07$). Par contre rien n'est détecté pour la variable "nombre d'années d'extinction" (Tableau 10).

Pour les pipistrelles Nathusius/Kuhl et pour le groupe des Myotis spp, aucune tendance significative de population n'est détectée dans les analyses. On note cependant pour le groupe des pipistrelles Nathusius/Kuhl, une fluctuation de sa présence avec un pic en 2010 (Figure 12). Pour les Myotis spp, on note une augmentation linéaire du nombre de secteurs où le groupe est détecté depuis 2007 (Figure 12). Le "nombre d'année d'extinction" n'a pas d'effet non plus (Tableau 10).

Discussion

1. Effet de l'éclairage public, analyses Vigie Chiro

A. L'effet des variables habitats et météorologiques

Les résultats concernant les habitats et les variables météorologiques sont cohérents avec l'écologie des Chiroptères (Arthur et Lemaire, 2009 ; Dietz *et al.* 2009). Il faut noter toutefois pour le milieu forestier que cette variable est fortement négativement corrélée à la superficie des milieux agricoles. Cet effet positif de la forêt pour les Chiroptères peut aussi être interprété comme un évitement des milieux agricoles. Cette cohérence nous conforte dans les conclusions des modèles sur les autres effets testés, notamment l'impact de l'éclairage.

B. L'effet de la lumière moyenne par secteur

La première variable de lumière testée est la lumière moyenne par secteur. Pour la pipistrelle commune plus la lumière moyenne par secteur augmente plus l'activité diminue. Cette relation ne semble en fait pas linéaire mais montre plutôt que l'activité est faible dans les valeurs très faibles de lumière puis augmente assez rapidement jusqu'à des valeurs de 1.6 nano-Watts (nW) pour ensuite diminuer. Il semble donc que l'activité de la pipistrelle commune soit sensible à cette lumière que l'on peut définir comme le halo lumineux. En comparant les valeurs de lumière de chaque pixel dans le PNRG avec celles de la France (Figure 1), on trouve une moyenne de $1.09 \text{ nW} \pm 1.6$ pour le PNRG et de $1.14 \text{ nW} \pm 4.4$

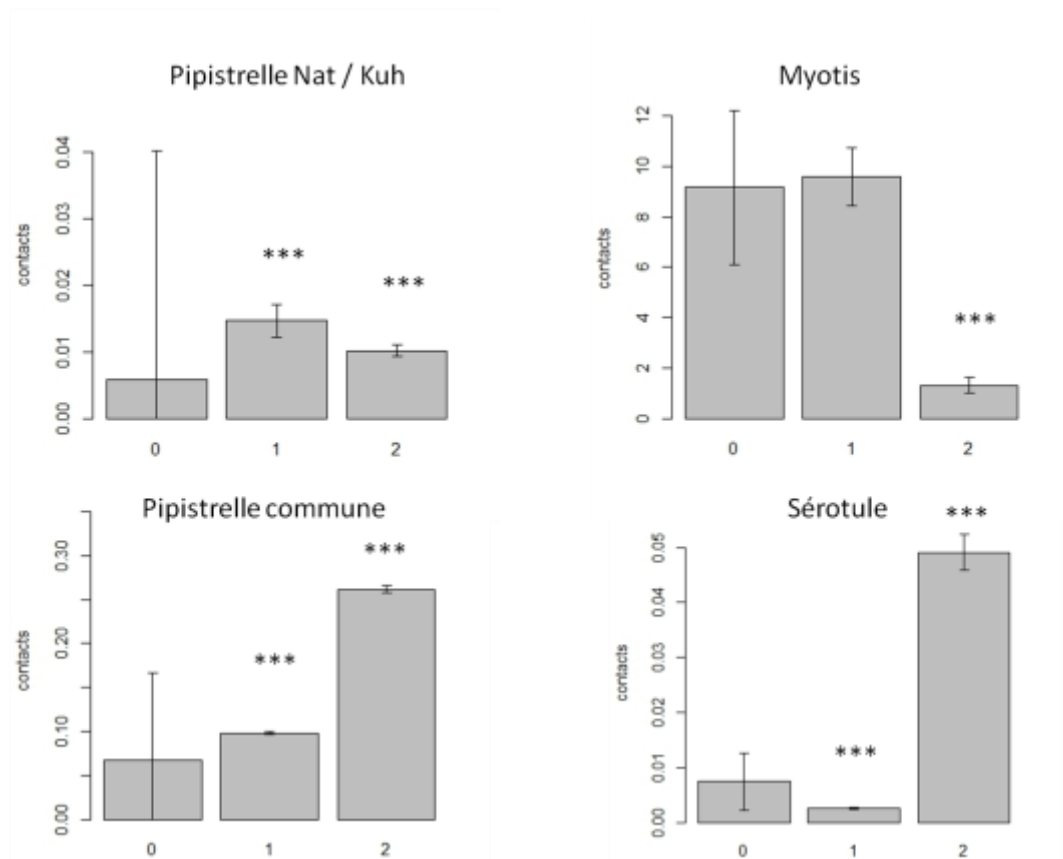


Figure 11: Barplot des estimates avec écart type présentant pour chaque espèce l'effet de l'extinction sur l'activité des Chiroptères sur l'ensemble de la nuit d'enregistrement pour le protocole Point Fixe, (0: Site "noir"; 1: Site avec lampadaire qui s'éteint au cours de la nuit; 2: Site avec lampadaire continuellement allumé). Les étoiles (*) représentent la significativité des résultats (* : p-value<0,05; ** : p-value<0,01; *** : p-value<0,001).

Tableau 10: Effet des variables "Tendance (années)" et le "Nombre d'années d'extinction" sur l'activité de chaque espèce (avec Estimate, Standard Error et indice de significativité). ns : non significatif; * : p-value<0,05; ** : p-value<0,01; *** : p-value<0,001.

Espèce ou groupe d'espèce	Tendance année 2007 à 2013	Nombre d'années d'extinction
Pipistrelle commune	-0.009 ± 0.026 ns	-0.021 ± 0.006 ***
Pipistrelle Nathusius/Kuhl	0.07816 ± 0.081 ns	0.004 ± 0.017 ns
Sérotule	-0.137 ± 0.042 **	-0.005 ± 0.01 ns
Myotis spp	0.093 ± 0.12 ns	-0.004 ± 0.026 ns

pour la France. Les valeurs du PNRG sont donc assez similaires à celles de la France. Dans les villes et villages de France, les valeurs vont de 1 à plus de 80 nW. On peut donc penser d'après ces résultats que peu d'espaces urbains sont optimaux à l'activité de la pipistrelle commune. On aurait pu s'attendre à un effet positif de cette variable pour cette espèce qui semble profiter de la lumière pour chasser mais on peut penser que plus le halo est puissant plus le secteur sera urbanisé et la productivité en insectes sera moindre dans un village au milieu d'une forêt (Bates *et al.* 2014). Pour les autres espèces, nous n'avons pas détecté de tendance mais cela peut s'expliquer peut être par un manque de données de présence plutôt que par un manque de réponse à cette variable.

C. *L'effet du nombre de lampadaires*

Pour l'effet du nombre de lampadaires, seules la pipistrelle commune et les Sérotules réagissent significativement. Pour les pipistrelles de Nathusius/ Kuhl, cela n'est pas significatif. Mais pour ces 3 groupes, l'effet va dans le même sens : plus le nombre de lampadaires le long d'un secteur augmente plus l'activité augmente, cette augmentation est toutefois assez faible. Cela semble cohérent avec l'attractivité de la lumière sur ces espèces (Haupt *et al.* 2006; Rydell 1992; Stone *et al.* 2012). Par contre on pourrait s'attendre à une diminution de l'activité dans les secteurs caractérisés par une forte densité de lampadaires comme pour la variable "lumière moyenne". Ce n'est pas le cas ici, mais cela peut être dû à un manque de secteurs avec de fortes densités de lampadaires. Pour les Myotis, aucun effet significatif n'est détecté. On aurait pu s'attendre à observer un nombre de secteurs où l'espèce est détectée moindre dans les secteurs denses en lampadaires, au vu de leurs comportements lucifuges (Kuijper *et al.* 2008 ; Stone *et al.* 2012).

D. *L'effet des variables extinctions*

Concernant l'impact de l'extinction de l'éclairage artificiel par les communes sur les chauves-souris, les analyses Vigie Chiro nous permettent de détecter certaines tendances. Pour l'extinction à l'échelle communale, seules les pipistrelles de Nathusius / Kuhl répondent de manière significative et positivement. Il y a donc proportionnellement plus de secteurs dans lesquels ce groupe est détecté dans les communes qui pratiquent l'extinction que dans celles qui ne la pratiquent pas. On aurait pu s'attendre à un effet contraire connaissant l'attractivité de ce groupe pour la lumière (Patriarca and Debernardi 2010). Comme le nombre de données est faible pour ce groupe il faut donc être prudent avec les résultats de cette analyse.

Lorsque l'on regarde le modèle comprenant la variable "extinction au moment du circuit", on retrouve des résultats cohérents avec la littérature concernant l'attractivité de la lumière pour

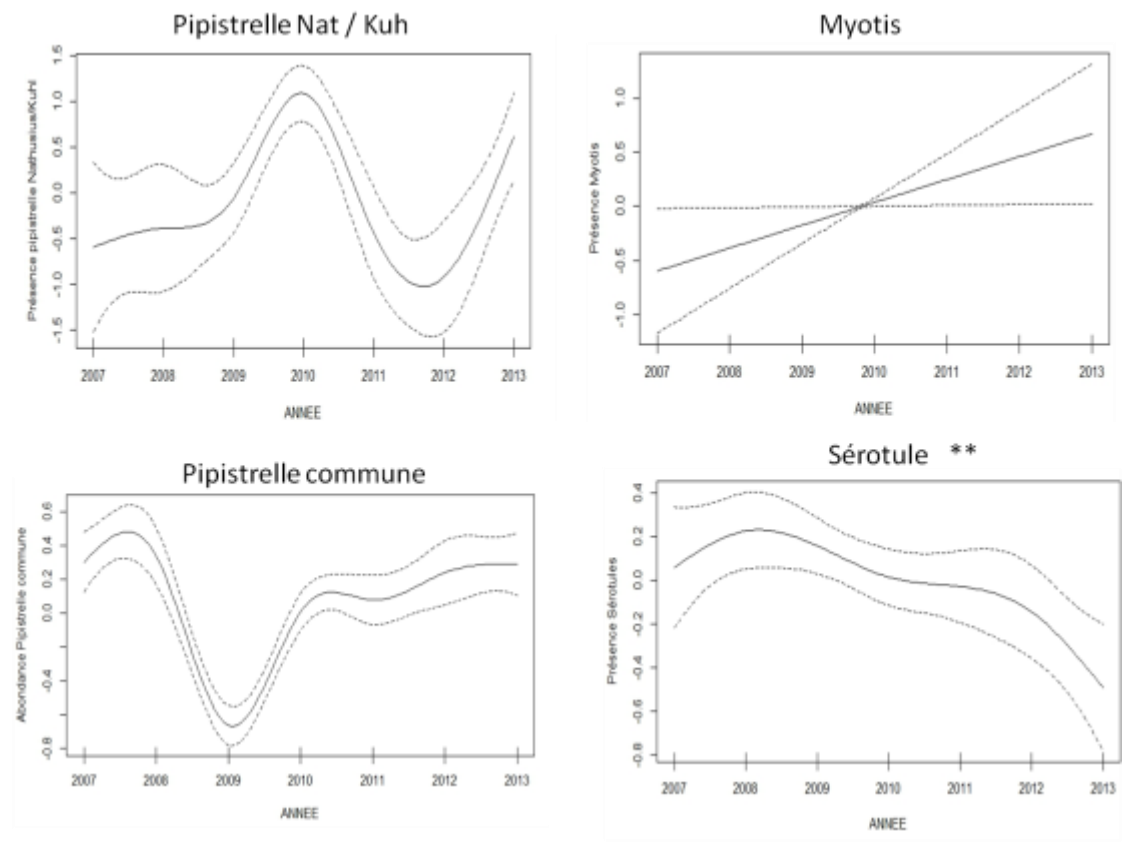


Figure 12: Courbes des tendances de population entre 2007 et 2013 du PNRG de chaque espèce (** : p-value<0,01).

les espèces “aériennes“ (pipistrelles et Sérotules). Il y a plus d’activité dans les secteurs avec lampadaires que dans les secteurs “noirs“ pour ces espèces.

Ensuite, on observe que l’activité des pipistrelles (commune et Nathusius/Kuhl) est plus importante dans les secteurs avec lampadaires éteints que dans les secteurs avec lampadaires allumés. Ces espèces seraient donc attirées par la lumière mais seraient plus actives quand les lampadaires sont éteints. Comme les enregistrements Vigie Chiro sont réalisés en début de nuit, les secteurs avec lampadaires éteints viennent en général tout juste de s’éteindre au moment du passage Vigie Chiro. La masse d’insectes attirée par la lumière est encore très probablement présente après le début de l’extinction. On peut penser que comme le risque de prédation est moins important dans les zones sombres, (Patriarca and Debernardi 2010), les pipistrelles profitent de cette situation pour chasser plus intensivement.

Pour les Myotis, aucun résultat significatif n’est trouvé mais on peut penser que cela est dû à un nombre de contacts trop faible pour ces espèces qui sont difficiles à détecter avec la méthode acoustique (Barataud, 2012) et qui sont peu fréquentes (Kerbiou *et al.* 2014).

2. L’effet de l’extinction, analyses du protocole Point Fixe

Le protocole Point Fixe permet d’une part de confirmer les résultats de Vigie Chiro, mais surtout de mettre en évidence des effets de l’éclairage sur des espèces faiblement détecté par le protocole Vigie Chiro comme par exemple les Myotis. Les espèces “aériennes“ sont plus actives dans les sites éclairés continuellement que dans les sites “noirs“ alors que les Myotis sont plus actifs dans les sites “noirs“ que dans les sites éclairés continuellement. Tout cela est cohérent avec la littérature (Haupt *et al.* 2006 ; Kuijper *et al.* 2008 ; Rydell 1992 ; Stone *et al.* 2012).

Quand on compare les sites avec extinction et les sites éclairés continuellement, on retrouve pour la pipistrelle commune et les Sérotules une activité sur l’ensemble de la nuit plus importante dans les sites éclairés en continu. Les pipistrelles de Nathusius/Kuhl sont par contre plus actives dans les sites avec extinction. Pour les Myotis, l’activité ne semble pas très différente entre les sites “noirs“ et les sites avec extinction. Ces résultats semblent cohérents avec la littérature, on peut noter toutefois que les pipistrelles de Nathusius/Kuhl sont moins attirées par la lumière que la pipistrelle commune.

Afin de confirmer les résultats de Vigie Chiro concernant une activité plus importante des pipistrelles dans les secteurs avec lampadaires éteints il serait intéressant de regarder la distribution des contacts heure par heure pour le protocole Point Fixe. Les conclusions de

3. Effet de l'extinction sur les tendances de populations du Gâtinais

L'analyse des tendances de populations du PNRG et d'un effet possible de l'extinction montre quelques informations intéressantes. Celles-ci devront être approfondies avec un nombre d'années de suivi encore plus important. Pour les tendances de populations, il n'y a qu'un résultat significatif pour les Sérotules où les populations seraient à la baisse depuis 2007. Pour les 3 autres espèces ou groupes, il n'y pas de tendances détectées.

Pour ce groupe des Sérotules, l'interaction avec l'extinction semble montrer que la tendance à la baisse est plus importante dans les secteurs où la commune pratique l'extinction. Il y aurait donc un effet négatif de l'extinction sur les tendances de population de Sérotules. Pour la pipistrelle commune, on observe que dans les secteurs où il y a extinction, plus le nombre d'années d'utilisation de cette pratique augmente, moins il y a de contacts de cette espèce. Cette espèce semble donc éviter ces zones et se reporte peut être sur des secteurs plus avantageux (commune sans extinction par exemple). Il serait intéressant de mesurer comment ces populations se répartissent dans le territoire selon ces conditions d'extinction au cours du temps.

4. Bilan sur l'extinction

Les Chiroptères réagissent de manière différente selon les espèces à cette mesure d'extinction de l'éclairage public. La lumière peut créer une compétition pour l'espace et pour l'accessibilité à la nourriture où les espèces attirées par la lumière (avec un vol rapide) seraient avantagées par rapport aux espèces lucifuges (avec un vol lent et papillonnant) (Arlettaz *et al.* 2000 ; Rydell, 1992 ; Safi and Kerth, 2004). L'augmentation de l'éclairage public favorise donc certaines espèces, les plus ubiquistes (Arthur et Lemaire, 2009). Un risque d'homogénéisation des communautés et d'une perte des fonctionnalités des écosystèmes est donc possible (Holker *et al.* 2010). L'extinction pourrait donc permettre de limiter cet effet en favorisant les espèces lucifuges.

5. Discussion des protocoles

Ces deux protocoles acoustiques permettent de faire des relevés non intrusifs sur ces mammifères mais la technique de détermination est difficile et il faut de nombreuses années de pratique pour déterminer certaines espèces (Barataud, 2012). Il serait donc intéressant d'aller plus loin dans certaines déterminations afin de pouvoir comparer la réaction à la lumière de chaque espèce notamment pour les Sérotules (Noctules commune, de Leisler et Sérotine commune) ou le genre *Myotis*. Vigie Chiro portent seulement sur le début de nuit alors qu'elles sont pour toute la nuit pour le protocole Point Fixe.

Il est intéressant de comparer ces deux protocoles, car avec Vigie Chiro, nous couvrons une large échelle spatiale avec un temps d'enregistrement faible alors qu'avec le protocole Point Fixe nous sommes à une échelle très locale mais avec un temps d'enregistrement long (une nuit complète). On peut également noter que le protocole Vigie Chiro, qui n'est pas destiné à étudier l'effet de la lumière sur les Chiroptères mais les tendances de populations, (Kerbiriou *et al.* 2006) permet de détecter des effets malgré un temps d'enregistrement très bref sous chaque source lumineuse. Le protocole Point Fixe, destiné spécifiquement à étudier cet effet de la lumière s'il confirme les résultats de Vigie Chiro est cependant plus puissant puisqu'il a permis de détecter des effets de l'éclairage sur la plupart des espèces même les moins abondantes comme les *Myotis* ssp.

Conclusion

Cette étude a permis de confirmer les observations déjà réalisées de l'influence de la lumière sur l'activité des Chiroptères. L'éclairage public a une forte influence sur l'activité, la répartition, la dynamique des différentes espèces et sur l'interaction entre celles-ci. Les mesures d'extinction de l'éclairage public ont un effet direct négatif ou positif selon les espèces. De manière globale, cette mesure serait bénéfique pour l'ensemble des écosystèmes, même si des zones sont à plus forts enjeux que d'autres (notamment dans les espaces ruraux). D'autres facteurs sont également à prendre en compte afin de favoriser une trame noire efficace comme le type d'ampoule, leurs couleurs et la direction de l'éclairage des lampadaires (Stone *et al.* 2009 ; Stone *et al.* 2012) ou la distance jusqu'à laquelle la lumière a un impact (analyse en cours ; Perkin *et al.* 2014). Les effets du halo lumineux et du nombre de lampadaires sont à préciser mais semblent avoir un effet sur les Chiroptères et peuvent potentiellement jouer à des échelles bien plus grandes que celles étudiées dans cette étude. Il semble important de considérer l'effet de l'éclairage public à une échelle locale et à une échelle plus large pouvant impacter notamment les mouvements migratoires. L'aménagement du territoire et de l'éclairage public doit donc prendre en compte ces mesures, ces facteurs et ces échelles afin de favoriser la biodiversité nocturne et rendre une trame verte et bleue efficace pour l'ensemble de la biodiversité. La sensibilisation des communes à éteindre leur éclairage au cours de la nuit doit être encouragée. Les arguments économiques (ADEME, 2012) et environnementaux (Gaston *et al.*, 2012) ne manquent pas. L'arrêté du 25 janvier 2013 sur l'extinction de l'éclairage des bâtiments non résidentiel est encourageant. Enfin des campagnes nationales de sensibilisation comme le "Jour de la Nuit" devrait permettre une prise de conscience de l'impact de la pollution lumineuse sur l'environnement.

Bibliographie

- Akaike, H. 1973. Information theory as an extension of the maximum likelihood principle. Pages 267–281 in BN Petrov, Csaki F, editors. Second International Symposium on Information Theory. Akad´emiai Kiad´o, Budapest, Hungary.
- Arlettaz R., Godat S., Meyer H. 2000. Competition for food by expanding pipistrelle bat populations (*Pipistrellus pipistrellus*) might contribute to the decline of lesser horseshoe bats (*Rhinolophus hipposideros*). *Biological Conservation*.93: 55-60.
- Arthur, L., Lemaire, M. 2009. Les chauves-souris de France, Belgique, Luxembourg et Suisse. Meze Biotope. Muséum National d'Histoire Naturelle.
- Barataud, M. 2012. Écologie acoustique des chiroptères d'Europe, identification des espèces, étude de leurs habitats et comportements de chasse. Publications scientifiques du Muséum. Biotope Éditions. 344p.
- Bates AJ, Sadler JP, Grundy D, Lowe N, Davis G, et al. 2014. Garden and Landscape-Scale Correlates of Moths of Differing Conservation Status: Significant Effects of Urbanization and Habitat Diversity. *Plos One*. 9-1.
- Beier, P., Rich, C. & Longcore, T. 2006. Effects of artificial night lighting on terrestrial mammals. In: Ecological consequences of artificial night lighting, Vol 02 pp. 19–42 Island Press. Washington DC.
- Boldogh, S., Dobrosi, D. & Samu, P. 2007. The effects of the illumination of buildings on house-dwelling bats and its conservation consequences. *Acta Chiropterologica*, 9, 527–534.
- Brooks, T. M., Mittermeier, R. a., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. a. B., Rylands, A. B., Konstant, W. R., Flick, P., Pilgrim, J., Oldfield, S., Magin, G. & Hilton-Taylor, C. 2002. Habitat loss and extinction in the hotspots of biodiversity. *Conservation Biology*, 16, 909–923.
- Crawley, M.J. (2009) The R Book. John Wiley & Sons, Chichester,UK.
- Davies, T. W., Bennie, J. & Gaston, K. J. 2012. Street lighting changes the composition of invertebrate communities. *Biology letters*, 8, 764–767.
- Dietz C, Helversen O von, Nill D. 2009. L'encyclopédie des chauves-souris d'Europe et d'Afrique du Nord: Biologie, caractéristiques, protection. Delachaux et Niestlé, Paris.
- Ethier, K. & Fahrig, L. 2011. Positive effects of forest fragmentation, independent of forest amount, on bat abundance in eastern Ontario, Canada. *Landscape Ecology*, 26, 865–876.
- Fahrig, L. 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34, 487–515.

- Faraway, J.J. 2006. Extending the Linear Model with R, Generalized Linear, Mixed Effects and Nonparametric Regression
- Fure, A. 2006. Bats and lighting. *The London Naturalist*, 85, 1–20.
- Gaston, K., Davies, T., Bennie¹, J., Hopkins, J. 2012. Reducing the ecological consequences of night-time light pollution: options and developments. *Journal of Applied Ecology*, 49, 1256–1266
- Haquart, A. 2013. Actichiro, référentiel d'activité des Chiroptères, éléments pour l'interprétation des dénombrements de Chiroptères avec les méthodes acoustiques en zone Méditerranéenne française. Mémoire Ecole pratique des hautes études. 100 p.
- Haupt, M., Menzler, S. & Schmidt, S. 2006. Flexibility of habitat use in *Eptesicus nilssonii* : does the species profit from anthropogenically altered habitats? *Journal of Mammalogy*, 87, 351–361.
- Hecker, K. R. & Brigham, R. M. 2014. Does moonlight change vertical stratification of activity by forest-dwelling insectivorous bats? *Journal of Mammalogy*, 80, 1196–1201.
- Hölker F, Wolter C, Perkin EK, Tockner K (2010a) Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in Ecology & Evolution*, 25, 681–682.
- Hölker F. and Tockner K. 2010. Loss of the Night, Transdisciplinary Research on Light Pollution. 1-20, Berlin.
- Jenkins, E., Laine, T. & Morgan, S. 1998. Roost selection in the pipistrelle bat, *Pipistrellus pipistrellus* (Chiroptera: Vespertilionidae), in northeast Scotland. *Animal behaviour*, 56, 909–917.
- Jones, G. & Rydell, J. 1994. Foraging strategy and predation risk as factors influencing emergence time in echolocating bats. *Philosophical transactions of the Royal Society of London.*, 346, 445–455.
- Jones, G., Jacobs, D. & Kunz, T. 2009. Carpe noctem: the importance of bats as bioindicators. *Endangered Species Research*, 8, 93–115.
- Karlsson, B., Eklöf, J. & Rydell, J. 2002. No lunar phobia in swarming insectivorous bats (family Vespertilionidae). *Journal of zoology*, 256, 473-477.
- Kerbiriou C., Julien J.F., Ancrenaz K., Gadot A.S., Loïs G., Jiguet F. & Julliard R. 2006. Suivi des espèces communes après les oiseaux ... les chauves-souris ? XI Rencontres « Chauves-souris » Muséum de Bourges 18-19 Mars, Bourges, France
- Kerbiriou C. Julien Jf., Arthur L., Depraetere M., Lemaire M., Le Viol I., Lorrilliere R., Maratrat J., Marmet J., Pellissier V. & Reneville C. 2014. Suivi national des chauves-souris communes et retombées locales. *Symbioses*, 32, 1-7.

- Kuijper, D. P. J., Schut, J., Dulleman, D. Van, Toorman, H., Goossens, N., Ouwehand, J. & Limpens, H. J. G. A. 2008. Experimental evidence of light disturbance along the commuting routes of pond bats (*Myotis dasycneme*). *Lutra* 51, 37–49.
- Kunz, T. H., Braun de Torrez, E., Bauer, D., Lobova, T. & Fleming, T. H. 2011. Ecosystem services provided by bats. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1223, 1–38.
- Lang, A., Kalko, E. & Römer, H. 2006. Activity levels of bats and katydids in relation to the lunar cycle. *Oecologia*, 146, 659–666.
- Loe, P., Kempnaers, B., Borgstro, P., Schlicht, E. & Valcu, M. 2010. Report artificial night lighting affects dawn song , extra-pair siring success , and lay date in songbirds. *Current Biology*, 20, 1735–1739.
- Longcore, T., Rich, C., Mineau, P., Macdonald, B., Bert, D. G., Sullivan, L. M., Mutrie, E., Gauthreaux, S. A., Avery, M. L., Crawford, R. L., Manville, A. M., Travis, E. R. & Drake, D. 2013. Avian mortality at communication towers in the United States and Canada : which species , how many , and where ? *Biological Conservation*, 158, 410–419.
- Patriarca, E. & Debernardi, P. 2010. Bats and light pollution. *Centro Regionale Chiroterri*
- Perkin, E. K., Hölker, F. & Tockner, K. 2014. The effects of artificial lighting on adult aquatic and terrestrial insects. *Freshwater Biology*, 59, 368–377.
- Rich C, Longcore T (2006) Ecological Consequences of Artificial Night Lighting. Island Press, Washington.
- Russo, D., Cistrone, L., Jones, G. 2007. Emergence time in forest bats: the influence of canopy closure. *Acta Oecologica*. 31, 119–126.
- Rydell, J. 1992. Exploitation of insects around streetlamps by bats in Sweden. *Functional Ecology*, 6, 744–750.
- Rydell, J., Entwistle, A. & Racey, P. A. 1996. Timing of foraging flights of three species of bats in relation to insect activity and predation risk. *Oikos*, 76, 243–252.
- Safi, K., Kerth, G. 2004. A comparative analysis of specialization and extinction risk in temperate-zone bats. *Conservation Biology*. 5, 1293-1303.
- Saldaña-Vázquez, R. & Munguía-Rosas, M. 2013. Lunar phobia in bats and its ecological correlates: A meta-analysis. *Mammalian Biology*, 78, 216–219.
- Stone, E. L., Jones, G. & Harris, S. 2009. Report street lighting disturbs commuting bats. *Current Biology*, 19, 1123–1127.
- Stone, E., Jones, G. & Harris, S. 2012. Conserving energy at a cost to biodiversity? Impacts of LED lighting on bats. *Global Change Biology*, 18, 2458–2465.

Tournant, P., Afonso, E., Roué, S., Giraudoux, P. & Foltête, J. 2013. Evaluating the effect of habitat connectivity on the distribution of lesser horseshoe bat maternity roosts using landscape graphs. *Biological Conservation*, 164, 39–49.

Turner, M. 1996. Species loss in fragments of tropical rain forest : a review of the evidence. *Journal of applied ecology*, 33, 200–209.

Zuur AF, Ieno EN, Walker NJ, Saveliev AA, Smith GM .2009. Mixed effects models and extensions in ecology with R. Springer. New York.

Parc naturel régional du Gâtinais français. Charte, le rapport 2011-2023. Décret du Premier Ministre du 27 avril 2011.

http://www.presse.ademe.fr/files/cp_eclairagepublic_20022012.pdf

Annexe 1 : Proportion de chaque type d'habitat pour les différentes catégories de régime lumineux

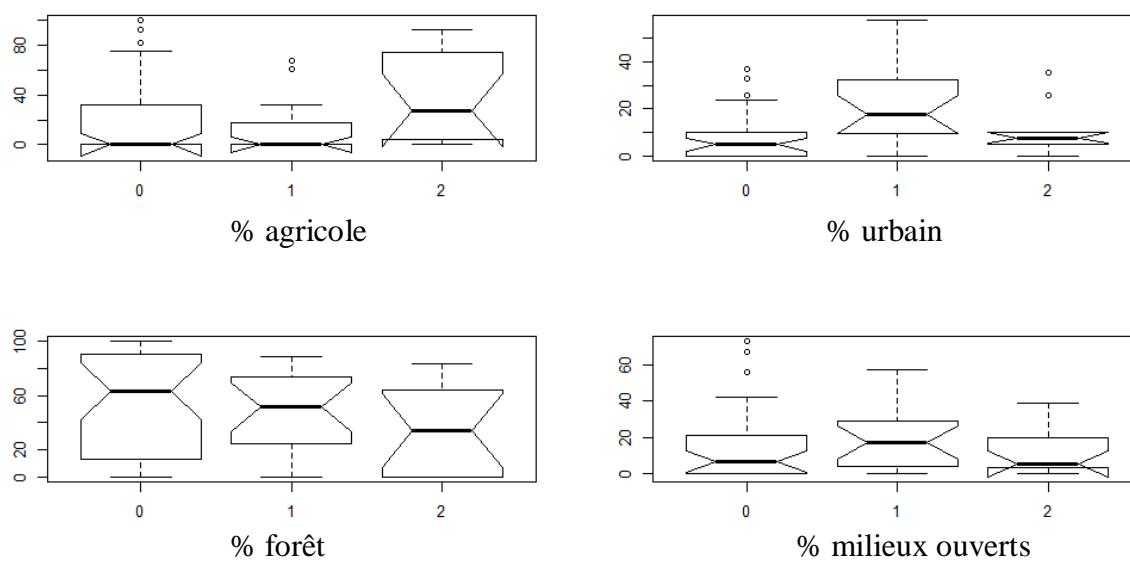
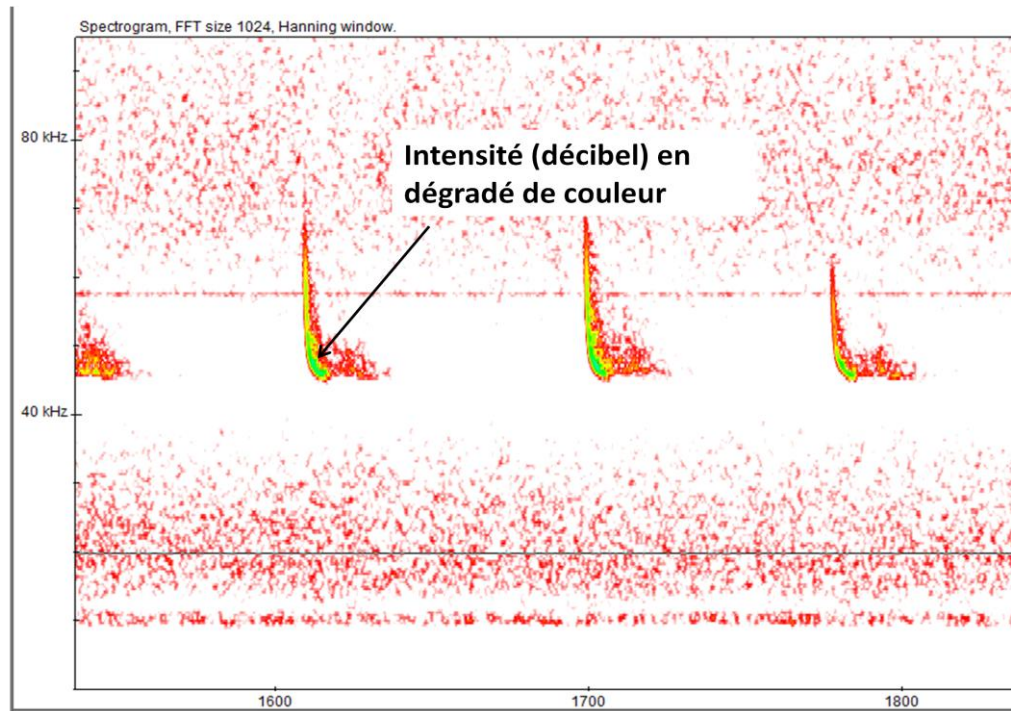


Figure 1: Proportion de chacune des variables paysagères (échelle buffer 100m) en fonction de la variable régime lumineux (0= site “noir“, 1= site avec lampadaire qui éteint, 2= site avec lampadaire allumé tout le temps), pour l’ensemble des sites échantillonnés.

Annexe 2 : Visualisation des cris et détermination

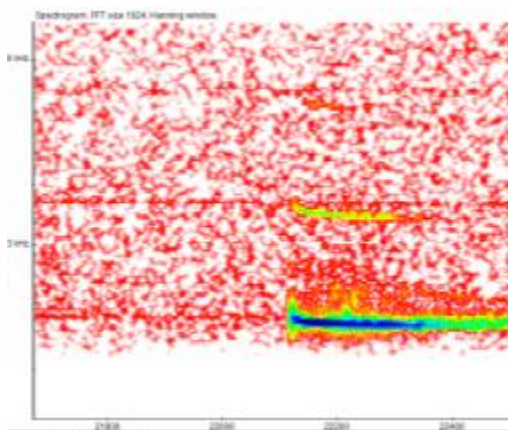
On peut visualiser les cris des Chauves-souris grâce à un sonagramme avec comme information la durée du cri (en millisecondes), la fréquence à laquelle est émis le cri (en kiloHertz) et l'intensité du cri (en décibel). En combinant ces critères, il est possible d'identifier les différentes espèces.

Fréquence (kHz)

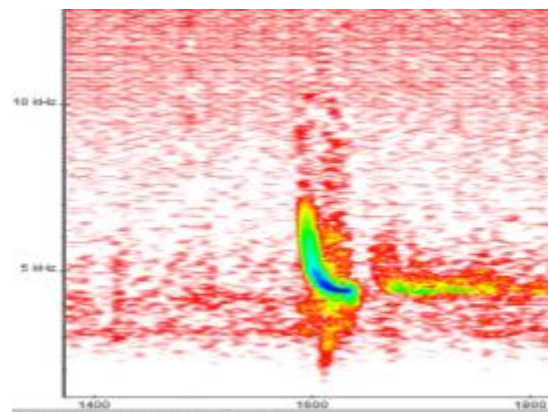


Durée (ms)

De plus, chaque espèce émet des types de cris différents qui nous aident à le détermination :
Les Pipistrelles, Noctules et Sérotines émettent des cris de type fréquence modulée aplanie et de type Quasi fréquence constante :

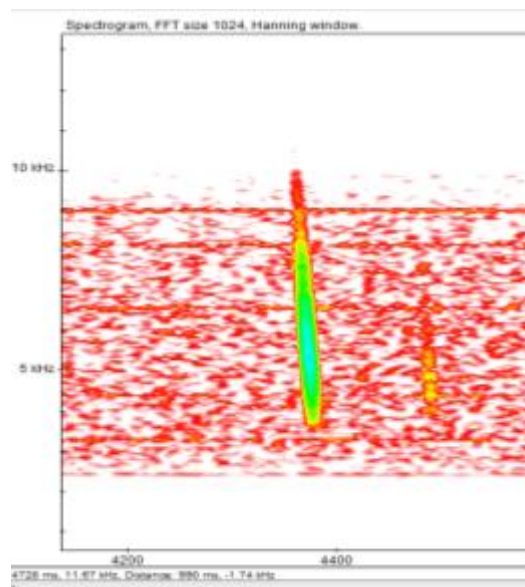


Cri en Quasi Fréquence Constante



Cri en fréquence modulée aplanie

Les Murins font quant à eux des cris de type fréquence modulée abrupte :



Cri en fréquence modulée abrupte

Annexe 3 : Valeurs des “corVIF” de chaque modèle utilisé

Tableau 1: Valeurs de corVIF de chaque variable utilisée pour les modèles de l'analyse Vigie Chiro

Variabiles explicatives	Modèle Extinction	Modèle Extinction pendant le circuit	Modèle Nombre de Lampadaires	Modèle Lumière moyenne
Extinction	1,106556			
Extinction circuit		1,986809		
Nombre lampadaire			2,272372	
Lumière moyenne				1,165004
foret	1,064165	1,06329	1,066994	1,059483
urbain	1,301074	1,765499	2,095134	1,358307
mil_ouv	1,277717	1,390247	1,385666	1,275477
dist_eau	1,195131	1,240062	1,202356	1,236704
Date	1,188362	1,189092	1,185892	1,188481
Temp	1,196305	1,19631	1,196604	1,209421
nuage	1,200257	1,195297	1,194561	1,203651
vent	1,276531	1,276047	1,276062	1,282249
Annee	2,26964	2,164735	2,16428	2,166316
Methode	1,969988	1,968507	1,968364	1,971789
Moyenne	1,367793273	1,494172273	1,546207727	1,374262

Tableau 2: Valeurs de corVIF de chaque variable utilisée pour les modèles du protocole Point Fixe

Variabiles explicatives	corVIF
<i>regime_lumineux</i>	1.1
<i>forêt</i>	1.6
<i>mil_ouv</i>	1.2
<i>urbain</i>	1.4
<i>dist_eau</i>	1.7
<i>Temp</i>	1.7
<i>Lune</i>	1.4

Résumé :

Actuellement, la pollution lumineuse fait partie des 10 questions majeures de la biologie de la conservation. Le Parc naturel régional du Gâtinais français souhaite mettre en place une trame noire sur son territoire car sa prise en compte dans les trames vertes et bleues est indispensable pour maintenir des corridors écologiques accessibles aux espèces nocturnes. Pour cela, il souhaite évaluer l'effet de l'extinction au cours de la nuit de l'éclairage public des communes sur l'activité des Chiroptères. Un important jeu de données acoustique issu du protocole Vigie Chiro du Muséum National d'Histoire Naturelle sur le territoire du Parc et une expérimentation avec méthode acoustique ont été réalisées et analysés pour étudier l'efficacité de cette mesure sur les Chiroptères. Nos résultats montrent que les espèces de Chiroptères réagissent de manière différente à cette gestion de l'éclairage public. En effet, l'extinction nocturne semble avoir un effet positif sur les espèces lucifuges comme les murins *Myotis spp.*, et un effet négatif sur les espèces attirées par les sources lumineuses comme les pipistrelles *Pipistrellus spp.* et les sérotines *Eptesicus sp.* Cette mesure d'extinction semblerait toutefois positive à mettre en place pour favoriser les déplacements et l'activité de l'ensemble de ces espèces nocturnes dans le cadre d'une trame verte, bleue et noire efficace.

Mots clés : Pollution lumineuse, extinction, Chiroptères, méthodes acoustiques, Trame noire, Parc naturel régional du Gâtinais français.

Summary :

Currently, light pollution is one of 10 major issues of conservation biology. The French Regional Park Gâtinais wants to set up a black infrastructure on its territory because its inclusion in the Green and Blue infrastructure is critical to maintaining accessible to nocturnal species ecological corridors. For this, it wants to evaluate the effect of extinction during the night of street lighting on the common bat activity. An important acoustic dataset from the protocol Vigie Chiro of the National Museum of Natural History on the Park territory and an experimentation with acoustic method were performed and analyzed to study the effectiveness of this measure on bats. Our results show that species of bat react differently to the management of artificial lighting. Indeed, the night extinction appears to have a positive effect on species avoiding to the light sources such as mouse-eared bats *Myotis spp.*, and a negative effect on species attracted to light sources such as pipistrelle bats *Pipistrellus spp.* and European house bats *Eptesicus sp.* This extinction however seems positive to put in place to promote the movement and activity of these nocturnal animals as part of a Green, Blue and Black infrastructure efficiently.

Key Words: Light pollution, extinction, bats, acoustic method, black corridor, French Regional Park Gâtinais.