HAL
open science

Comment limiter les impacts écologiques de l'éclairage artificiel nocturne le long des ILTe ? Caractérisation de l'influence des paramètres lumineux des lampes sur les mouvements des chiroptères

Kévin Barré, Isabelle Le Viol, Samuel Challéat, Christian Kerbiriou, Ros Kiri-Ing, Dany Lapostolle, Kamiel Spoelstra, Georges Zissis

To cite this version:

Kévin Barré, Isabelle Le Viol, Samuel Challéat, Christian Kerbiriou, Ros Kiri-Ing, et al.. Comment limiter les impacts écologiques de l'éclairage artificiel nocturne le long des ILTe ? Caractérisation de l'influence des paramètres lumineux des lampes sur les mouvements des chiroptères. Muséum National d'Histoire Naturelle. 2021, 38 p. hal-03976568

HAL Id: hal-03976568

https://hal.science/hal-03976568v1

Submitted on 7 Feb 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Janv 2021D

PROJET CHIROLUM

Comment limiter les impacts écologiques de l'éclairage artificiel nocturne le long des ILTe ? *Caractérisation de l'influence des paramètres lumineux des lampes sur les mouvements des chiroptères.*

Kévin Barré[1], Isabelle Le Viol*[1], Samuel Challéat[3], Christian Kerbiriou[1], Ros Kiri-Ing[6], Dany Lapostolle[4], Kamiel Spoelstra[2], Georges Zissis[5].

1. Centre d'Ecologie et des Sciences de la Conservation (CESCO, UMR 7204), Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris. * Coordinatrice du projet
2. Netherlands Institute of Ecology (NIOO-KNAW), University of Wageningen
3. Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires (LISST, UMR 5193), Université de Toulouse 2 - Jean Jaurès
4. Laboratoire Théoriser et Modéliser pour Aménager (ThéMA, UMR CNRS 6049), Université de Franche-Comté
5. Laboratoire PLAsma et Conversion d'Energie (LAPLACE, UMR 5213), Université Paul Sabatier, Toulouse
6. Laboratoire Ondes et Acoustique (UMR 7587) Institut Langevin- ESPCI, Paris

Etude réalisée avec le soutien de l'ADEME

RAPPORT FINAL D'ACTIVITE

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

En partenariat avec :

CESCO Centre d'Écologie et des Sciences de la Conservation
Muséum National d'Histoire Naturelle
WAGENINGEN UNIVERSITY & RESEARCH
Institut Langevin ONDES ET IMAGES
Université Toulouse Jean Jaurès
Université Toulouse III Paul Sabatier

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier :
Clémentine Azam, Yves Bas, Jean-François Julien, Émilion Esnault, Joël Lavergne, Laurence Berasategui, Loïc Gascon, Pierre Cambon, Bénédicte Sarramon, Yannick Even, Catherine Frustie-Cocquerez, Émilie Collet, Émilie Marsaud, Elliot Shaw, Romain Sordello, Christophe Carbonneaux, Sébastien Vauclair

CITATION DE CE RAPPORT

Kévin Barré, Isabelle Le Viol, Christian Kerbiriou, Kamiel Spoelstra, Samuel Challéat, Dany Lapostolle, Georges Zissis, Ros Kiri-Ing.2020. Comment limiter les impacts écologiques de l'éclairage artificiel nocturne le long des ILTe ? Caractérisation de l'influence des paramètres lumineux des lampes sur les mouvements des chiroptères. – Rapport

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1866C0012
Projet de recherche coordonné par : Isabelle Le Viol

Coordination technique - ADEME : TAILLANT Pierre
Service Transport et Mobilité

TABLE DES MATIERES

1. CONTEXTE DE L'ETUDE 4

2. OBJECTIFS DE L'ETUDE..... 7

3. ORGANISATION DE L'ETUDE 8

4. AXE 1 EFFET COMBINE DU SPECTRE, DE L'INTENSITE LUMINEUSE ET DE LA DUREE DE L'ECLAIRAGE SUR LES MOUVEMENTS DE CHIROPTERES 9

4.1. Contexte 9

4.2. Méthodologie 9

4.3. Résultats 10

5. AXE 2 : EFFET DE L'ECLAIRAGE (LED) DES PONTS SUR LES MOUVEMENTS DE CHIROPTERES LE LONG DES CANAUX (CANAL DU MIDI) 17

5.1. Contexte 17

5.2. Méthodologie 17

5.3. Résultats 19

6. AXE 3 : IDENTIFIER LES CONTRAINTES REGLEMENTAIRES ET CARACTERISER LA PERCEPTION DES DIMENSIONS SOCIO-ECOSYSTEMIQUES DE L'ECLAIRAGE PUBLIC PAR LES GESTIONNAIRES ET LES USAGERS 22

6.1. Contexte 22

6.2. Méthodologie 22

6.3. Résultats 23

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES 30

8. VALORISATIONS REALISEES OU EN COURS 31

9. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 32

10. INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES 34

11. SIGLES ET ACRONYMES 35

1. Contexte de l'étude

Les changements d'usage des sols, induits par les mutations socio-économiques des sociétés humaines, sont devenus depuis la révolution industrielle un des principaux facteurs d'érosion de la biodiversité dans le monde (Newbold et al. 2016). Ces changements sont caractérisés par une intensification des pratiques agricoles et une urbanisation massive liée au phénomène d'exode rural (Foley et al. 2005). En effet, plus de la moitié de la population mondiale vit actuellement en milieu urbain, et cette proportion est attendue atteindre 66% en 2050 (United Nations 2014). Cette mutation des modes de vie a entrainé une augmentation massive de l'étendue des zones urbaines et un développement considérable des infrastructures linéaires de transports (ILTe) pour les mouvements des biens et des personnes (Foley et al. 2005), qu'il s'agisse de transport routier, ferré ou fluvial. En particulier, la France possède un des réseaux d'ILTe les plus denses d'Europe avec notamment 1 073 000 km de routes et 38 200 km d'autoroutes en 2014 (SoeS 2016).

Le développement de ces ILTe s'est traduit par différents types d'impacts sur la biodiversité. La construction de ces ILTe entrainent en premier lieu une perte d'habitat directe due à la modification des habitats (asphaltage, canalisation, défrichage) pendant la construction des infrastructures, Leur mise en service ultérieure est source de destructions directes (mortalité) à travers les collisions qui se traduisent par des impacts négatifs sur la démographie des populations de vertébrés et d'invertébrés (Trombulak et al. 2000; Benítez-López et al. 2010; Fensome & Mathews 2016). Ces infrastructures entrainent également des impacts indirects par perte d'habitat. Ces ILTes génèrent enfin des effets « barrières » aux mouvements et diminuent ainsi la connectivité structurelle et fonctionnelle des paysages (Bennett & Zurcher 2013; Bennett et al. 2013). Le cumul de ces impacts peut modifier la taille et la distribution spatiale des domaines vitaux des populations, et entrainer des déclins, voire des extinctions locales, dans les paysages avec une forte densité d'ILTe (Trombulak et al. 2000; Benítez-López et al. 2010; Kociolek et al. 2011).

Cependant, les ILTe sont aussi associées à des dépendances vertes (e.g. prairies, haies arborées, ripisylves, bassins de rétention des eaux pluviales) qui peuvent former des patchs de ressources pour certaines espèces et jouer un rôle de maintien d'une certaine biodiversité dans les paysages anthropisés voire de corridor écologique le long des ILTes comme montré par la revue systématique COHNECS-IT soutenue par ITTECOP (Jeusset et al. 2016). Plusieurs études ont ainsi révélé que les bords de voies ferrées et routières ainsi que des voies navigables pouvaient former des patches de ressources pour les plantes, les arthropodes, et les chiroptères en milieu urbain et d'agriculture intensive (Saarinen et al. 2005; Le Viol et al. 2008; Penone et al. 2012 ; Vandevelde et al. 2014; Kalarus & Bąkowski 2015; Berg et al. 2016 ; De Conno et al. 2018). Les bassins de rétention des eaux pluviales des autoroutes complétent dans certains paysages anthropisés les réseaux de mares à l'échelle du paysage et peuvent constituer des habitats de reproduction pour différentes espèces d'amphibiens et de macro-invertébrés (Le Viol et al. 2009, 2012). De même, les berges du réseau des voies navigables de France peuvent-elles constituer des corridors pour nombre d'espèces dépendant de manière plus ou moins étroite des ressources liées aux milieux aquatiques. Ainsi, les dépendances vertes associées aux ILTe jouent elles certains rôles fonctionnels (habitats, corridors) pour une certaine biodiversité en particulier dans le cas des paysages fortement anthropisés, et peuvent contribuer en particulier, dans le cas des voies navigables (Lintott et al. 2015), aux réseaux de Trames Vertes et Bleues (TVBs) et ainsi contribuer à maintenir une certaine connectivité paysagère dans la mesure où elles sont gérées en faveur de cette biodiversité (Lintott et al. 2015).

Cette gestion à l'échelle des paysages, intégrant de manière effective les objectifs de conservation de la biodiversité, passe par une réduction des impacts de ces ILTes via l'adoption de différents types de mesures, ciblées sur les impacts directs et indirects induits, au sein des emprises et en

dehors de celles-ci. L'un des enjeux forts est ainsi de réduire les pollutions associées à ces infrastructures, qu'elles soient chimiques, sonores, lumineuses (Russo et al. 2019).

En particulier, la pollution lumineuse est principalement induite par l'éclairage artificiel nocturne mis en place le long des voies routières interurbaines (e.g. autoroutes, nationales), urbaines (e.g. boulevards, avenues, rocades) et rurales (e.g. voies d'accès, ronds-points, rues principales). Bien qu'elle soit intrinsèquement corrélée aux zones urbaines et aux réseaux routiers et autoroutiers, elle se propage au-delà des surfaces imperméabilisées et affecte une part significative des écosystèmes environnants (Davies et al. 2014; Gaston et al. 2015; Azam et al. 2016). Sa réduction revêt un enjeu particulièrement important pour les écosystèmes aquatiques car les réseaux routiers et les zones urbaines sont souvent situés à proximité des réseaux fluviaux et de canaux. Ces réseaux forment à la fois des corridors écologiques pour les espèces (Arthur et al. 2014; Lintott et al. 2015), et des voies navigables pour le transport marchand et touristique. Il y a donc une interaction forte entre les ILTe navigables et routières liée à la pollution lumineuse.

Depuis la dernière décennie, de nombreuses inquiétudes ont émergé quant aux impacts de la pollution lumineuse sur la biodiversité puisqu'il a été estimé que 30 % des vertébrés et 60 % des invertébrés sont nocturnes (Hölker et al. 2010). En effet, en moins d'un siècle, cette pollution est devenue un changement global qui affecte 23 % de la surface terrestre mondiale (88 % de l'Europe), et qui connait un accroissement mondial de 6 % par an (Hölker et al. 2010; Falchi et al. 2016). Plusieurs études ont révélé que la pollution lumineuse impacte les dynamiques spatiotemporelles des espèces en 1) perturbant leurs rythmes circadiens et saisonniers, et 2) générant une perte et une fragmentation des paysages nocturnes (Perkin et al. 2011; Stone et al. 2014; Da Silva et al. 2015; Raap et al. 2015). En conséquence, ces impacts cumulés sur les espèces perturbent les dynamiques des communautés biologiques et le fonctionnement des écosystèmes (Bennie et al. 2015; Macgregor et al. 2016; Ffrench-Constant et al. 2016, Knop et al. 2017).

La pollution lumineuse constitue donc une pression supplémentaire sur la biodiversité qui exacerbe les effets négatifs des ILTe sur les fonctionnalités écologiques des territoires et des dépendances vertes. Sa prise en compte dans les stratégies de gestion des ILTe est donc cruciale pour limiter leurs impacts sur les écosystèmes adjacents et assurer l'intégration des dépendances vertes dans les réseaux de continuités écologiques (Lugon et al. 2017, Sordello et al. 2014).

Différents paramètres lumineux comme le spectre lumineux et l'intensité lumineuse des lampes ou encore la durée d'éclairage peuvent être modifiés pour limiter ses impacts sur la biodiversité. En effet, les lampes émettant des longueurs d'ondes faibles (bleue et UV) ont un impact particulièrement négatif sur les espèces car elles entrainent des perturbations physiologiques chez les individus exposés et sont responsables de la phototaxie des insectes (Thapan et al. 2001; van Langevelde et al. 2011). Ainsi, favoriser des lampes à spectre chaud avec une composante réduite, voire absente, de bleu et d'UV semble pouvoir limiter les perturbations de l'horloge biologique des populations et diminuer l'attraction et le déclin des insectes (Owens et al. 2018, 2019 ; van Grunsven et al., 2020). L'intensité lumineuse affecte quant à elle fortement les patterns de distribution spatio-temporelle des espèces nocturnes, et ce de manière plus ou moins forte selon la valeur de l'intensité et la sensibilité des espèces (Sanders et al. 2020). Elle affecte ainsi négativement les activités de déplacement (chasse et transit) des chiroptères lucifuges, et ce dès des seuils de faibles d'intensité : il est ainsi par exemple recommandé de limiter l'éclairement de la végétation à proximité des lampadaires à moins de 0.1 lux (Stone et al. 2012; Azam et al. 2017). L'extinction nocturne des lampadaires, lorsqu'elle est pratiquée quelques heures après le coucher du soleil ne réduit par contre pas substantiellement les impacts négatifs de l'éclairage sur les espèces lucifuges : elle n'a par exemple pas d'effet significatif sur l'activité des espèces de chiroptères lorsqu'elle est pratiquée après 23h en période de reproduction (Azam et al. 2015; Day et al. 2015).

A l'heure actuelle, la plupart des études n'ont cependant mesuré l'impact que d'un seul paramètre lumineux sur la biodiversité, à la fois, sans considérer leurs interactions potentielles. Par exemple, l'effet de l'intensité lumineuse sur la biodiversité en fonction du spectre lumineux des lampes est inconnu. De la même façon, les éléments de connaissance manquent sur l'efficacité relative de toutes les mesures de réduction d'impact. L'effet de ces paramètres est par ailleurs principalement étudié en considérant leurs impacts sur l'abondance-activité des individus d'espèces mais peu de manière fonctionnelle en caractérisant les mouvements et le comportement des individus. Cette caractérisation fonctionnelle apporte pourtant des informations complémentaires, pouvant permettre de détecter des effets jusqu'à présent indétectables en étudiant simplement les abondances d'espèces et surtout d'offrir des éléments de compréhension des mécanismes sous-jacents. Il est ainsi crucial de mieux caractériser quelle(s) combinaison(s) de paramètres a(ont) le moins d'effets négatifs afin de guider la définition des stratégies d'éclairage optimales limitant efficacement ces impacts sur la biodiversité. Cette recherche est particulièrement cruciale à l'heure actuelle car l'éclairage public est en fin de vie en France et en Europe et va être renouvelé dans la prochaine décennie (Hölker et al. 2010). Ce changement est lié à l'émergence de nouvelles technologies d'éclairage efficiente en énergie, comme les LEDs, qui permettent de moduler simultanément le spectre et l'intensité lumineuse en fonction des besoins, et de diriger la lumière sur les zones d'intérêt de façon précise (Kyba et al. 2014). Ces technologies peuvent aussi être associées à des compteurs digitaux permettant d'adapter l'éclairage dans le temps et dans l'espace aux usages réels des citoyens (i.e. « smart lighting technologies »). Ainsi, ces technologies peuvent offrir de nouveaux leviers d'actions pour gérer l'éclairage le long des ILTe de façon dynamique et flexible afin de réduire ces impacts sur les écosystèmes environnants.

Toutefois, la prise en compte des impacts écologiques de l'éclairage se heurte actuellement aux contraintes réglementaires auxquelles sont confrontées les éclairagistes et les gestionnaires d'ILTe. En effet, selon la norme européenne EN13201, les opérateurs doivent respecter des valeurs minimales d'éclairement et de luminance pour chaque type de voie publique afin d'assurer l'accomplissement des tâches visuelles des conducteurs, des cyclistes et des piétons et de maximiser la détection d'obstacles (AFE 2007). A la différence d'autres pays comme la Belgique, l'éclairage des routes interurbaines et rurales n'est pas obligatoire en France sur tout le réseau. Cependant, il doit être présent dans toute zone où conducteurs et usagers doivent accroitre leur attention (e.g. passages piétons, ponts, intersections, voies d'accès, échangeurs). De plus, les lampes utilisées doivent avoir un Indice de Rendu de Couleur élevé (proche du blanc ; i.e. avec une composante de bleu) pour permettre de restituer correctement les couleurs des objets et permettre aux usagers d'identifier correctement les obstacles.

Par ailleurs, la diminution des impacts de l'éclairage artificiel nocturne peut être associée à de forts enjeux d'acceptabilité sociale car l'éclairage est perçu par les citoyens comme un facteur de sécurité (AFE 2015). Ainsi, l'élaboration de stratégies d'éclairage durable doit suivre une approche interdisciplinaire pour permettre de trouver un compromis entre les enjeux écologiques, sociaux et réglementaires (Meier et al. 2015).

2. Objectifs de l'étude

Monté en partenariat entre 6 équipes de recherche à l'interface entre l'écologie, la physique et la géographie de l'environnement, le projet CHIROLUM vise à identifier les leviers d'actions permettant de mettre en œuvre des stratégies de réduction des impacts de l'éclairage LED sur la biodiversité le long des ILTe, tout en conciliant enjeux sociaux et réglementaires. Les objectifs sont de :

i) Caractériser les effets combinés de l'intensité lumineuse, du spectre des lampes et de la durée d'éclairage des nouveaux lampadaires LEDs sur la biodiversité, en particulier les chiroptères.

ii) Confronter les leviers d'action identifiés aux contraintes réglementaires et aux perceptions des usagers et des gestionnaires,

iii) Proposer des recommandations opérationnelles et applicables aux acteurs de l'éclairage afin d'élaborer des stratégies d'aménagement qui concilient les enjeux sécuritaires, sociaux et écologiques.

Pour répondre à ces objectifs, trois axes de recherche basés sur deux expérimentations *in situ* et des entretiens auprès des acteurs et des usagers ont été proposés, à savoir :

- **AXE 1 :** Caractériser l'effet combiné du spectre, de l'intensité lumineuse et la durée de l'éclairage sur les mouvements de chiroptères
- **AXE 2 :** Analyser l'impact de lampadaires LEDs sur les mouvements de chiroptères le long du Canal du Midi à Toulouse
- **AXE 3 :** Identifier les contraintes réglementaires et caractériser la perception des dimensions socio-écosystémiques de l'éclairage public par les gestionnaires et les usagers.

3. Organisation de l'étude

L'équipe projet étant par essence pluridisciplinaire, nous avons choisi :

i) d'organiser un séminaire de lancement réunissant les partenaires dès le recrutement de Kévin Barré en tant que post-doctorant (1er février 2018), l'enjeu étant d'échanger, de mettre en commun les différentes visions et complémentarités, de mutualiser et acter les connaissances déjà acquises par les différentes équipes et dans la littérature afin d'identifier les questionnements les plus innovants et appliqués possibles. Ce séminaire, organisé sur deux jours en fin février 2018 à Toulouse a été accueilli par le laboratoire LAPLACE et a permis de définir plus précisément les actions à mettre en œuvre et en particulier les possibilités d'expérimentations au regard des connaissances existantes et les manières de les mettre en œuvre (collaborations, calendrier).

ii) de fonctionner ensuite sous forme de sous-équipe-projet (modulable) en fonction des besoins aux différentes étapes du projet et des études à mener. Ces sous-équipes se sont réunies régulièrement de visu ou par visioconférences en fonction des besoins.

iii) d'organiser un séminaire de restitution réunissant tous les membres du projet à la fin du projet (fin novembre 2019).

A noter qu'en plus du soutien d'ITTECOP (ADEME, FRB), le projet a pu bénéficier en 2019 du soutien de la FRB pour un financement de stage de master 2 pour le volet recherche en écologie (Iuna Thomas, M2, AgroCampusOuest, Rennes 1).

Afin de répondre aux objectifs des axes 1 et 2, deux études en écologie ont été réalisées l'été 2018 à une période favorable à l'activité des chiroptères (reproduction, élevage des jeunes), en deux phases, l'une en juin à Toulouse, l'autre en juillet aux Pays Bas. Un travail d'enquête par entretiens semi-directifs a par ailleurs été réalisé à Toulouse en juin 2018 pour répondre plus spécifiquement aux questionnements de l'axe 3.

Ces travaux et les collaborations qui en sont issues ont abouti à la rédaction de trois publications dans des revues scientifiques (de rang A, Annexe), une en révision majeure, la rédaction d'un rapport de master 2 et le projet de publications de vulgarisation en français de certaines de ces recherches.

4. AXE 1 : Caractériser l'effet combiné du spectre, de l'intensité lumineuse et la durée de l'éclairage sur les mouvements de chiroptères

4.1. Contexte

Pour répondre aux objectifs de l'axe 1, à savoir « Caractériser l'effet combiné du spectre, de l'intensité lumineuse et la durée de l'éclairage sur les mouvements de chiroptères » nous avons étudié l'impact de différents spectres lumineux (rouge, blanc, vert et témoin non éclairé) et de l'intensité de la lumière sur le comportement de vol des chiroptères en déplacement le long de lisière forestière afin de mieux évaluer l'effet de ces paramètres sur la connectivité fonctionnelle.

Notre hypothèse était que les chauves-souris évitent de voler dans le halo lumineux (de manière à limiter les risques de prédation) c'est-à-dire de s'exposer à des intensités « fortes » de lumière et ce d'autant plus que l'espèce (ou le groupe d'espèces) est sensible au risque potentiel de prédation (type de vol).

Ainsi fait-on l'hypothèse **(A)** que les chauves-souris en bordure de lisière forestière, modifient leur trajectoire de vol lorsqu'elles s'approchent du lampadaire : i) ainsi plus la distance au lampadaire se réduit, plus devraient-elles être détectées proportionnellement en plus grande abondance du côté fermé de la lisère (donc à l'intérieur de la forêt) qu'en milieu ouvert exposé, ii) cette réaction comportementale devrait être observée à une distance d'autant plus grande du lampadaire que l'espèce (le groupe d'espèces) est sensible à l'éclairage (cas des *Myotis* et des *Plecotus* relativement aux Pipistrelles moins sensibles) et iii) surtout que les valeurs de spectre de l'éclairage sont froides (noir, rouge, vert, blanc). Nous nous attendons également **(B)** à ce que le nombre de traversées (complètes) du halo lumineux soit d'autant plus faible que les valeurs de spectre de l'éclairage se situent dans le blanc, le vert, que le rouge et bien sûr le noir.

4.2. Méthodologie

Pour tester ces hypothèses, nous avons réalisé une étude (en Juillet durant 3 semaines) mobilisant un dispositif expérimental développé *in natura* aux Pays-Bas (Figure 1) sur 6 sites sur lesquels des lampadaires de 4 spectres différents (rouge, vert et blanc et témoin non éclairé) étaient implantés en bordure de lisière forestière, et autour desquels ont été enregistrées les trajectoires de vol des chiroptères pour comparaisons entre les différents spectres.

Figure 1. Illustrations d'exemples de sites expérimentaux aux Pays-Bas, à gauche un lampadaire vert et à droite un lampadaire rouge avec le matériel de suivi déployé.

Pour l'hypothèse (A), l'étude a mobilisé des outils de trajectographie (antenne développée par Ros Kiri-Ing, Institut Langevin), qui permettent de reconstituer finement les positions (donc les trajectoires) de vol des chauves-souris dans l'espace (rayon de 30 mètres) et donc notamment la distance aux lampes. Ce dispositif ne pouvant être déployé que sur un seul lampadaire par nuit et nécessitant la présence permanente d'une personne, des enregistrements au cours de 12 débuts de nuit (3 premières heures) ont été réalisés de manière à échantillonner chaque nuit une couleur de lampe. La figure 2 ci-dessous schématise l'expérience et la standardisation effectuée pour rendre les sites comparables.

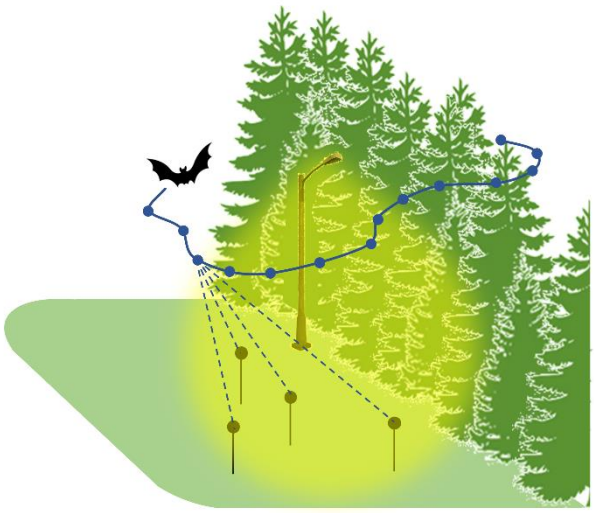

Figure 2. Représentation schématique de l'expérience à base de trajectographie aux Pays-Bas.

Pour l'hypothèse B portant sur l'effet des spectres sur les traversées (complètes) du halo lumineux par les chauves-souris, l'étude a consisté à réaliser des enregistrements simultanés des émissions ultrasonores de part et d'autre de chaque type de lampadaire simultanément chaque nuit grâce à la mobilisation de Song Meter Bat 2 déployables en plus grand nombre. Les enregistrements ont été réalisés au cours de 15 nuits complètes soit un total de 120 sites échantillonnés de manière équilibrée selon les différentes couleurs d'éclairage. La synchronisation des enregistrements entre enregistreurs disposés de part et d'autre du lampadaire nous a ensuite permis de calculer le nombre de traversées complètes du halo lumineux, ainsi que les traversées partielles, et ainsi d'en déduire le taux d'individus ayant franchi le halo.

4.3. Résultats

Etude par trajectographie (Hypothèse A).

L'étude par trajectographie a permis de collecter des informations sur les positions et donc les trajectoires des chiroptères en vol à proximité des lampadaires de différentes couleurs. Plus de 31 000 positions spatiales et environ 1900 trajectoires complètes ont pu être analysées pour 3 grands groupes de chauves-souris aux écologies contrastées : les pipistrelles (espèces de lisière), les noctules/sérotines (espèces de lisière à milieu ouvert) et les murins/oreillards (espèces de milieu fermé).

Sous l'hypothèse que les chauves-souris évitent de voler dans le halo lumineux, nous avons alors testé si ces groupes d'espèces avaient plutôt tendance à éviter les lampes, en se décalant du milieu ouvert vers le milieu fermé de la lisère et ce d'autant plus que l'éclairage du lampadaire était blanc que rouge (ou absent si témoin). Cette hypothèse a été testée y compris pour des espèces de lisière et de milieux ouverts, connues pour voler beaucoup plus rarement en milieu fermé comme les sous-bois. L'étude a été publiée dans un journal de premier rang (Movement Ecology, https://doi.org/10.1186/s40462-020-00238-2).

Les résultats montrent que plus une chauve-souris du groupe des pipistrelles et des murins/oreillards se trouve proche de la lampe et plus la probabilité est forte qu'elle vole du côté fermé de la lisière, c'est-à-dire à l'intérieur de la forêt, plutôt que du côté ouvert (Figure 3). Ceci est d'autant plus marqué en conditions de lumière blanche qu'en rouge. La distance à la lampe, à partir de laquelle la probabilité de voler du coté fermé plutôt qu'ouvert devient plus importante, est là aussi plus grande (de 1 à 2 m) pour la lumière blanche que rouge excepté pour les pipistrelles pour lesquelles la lumière rouge semble impacter au moins autant le comportement. Plus surprenant encore, à une distance d'environ 6 mètres pour les sérotines/noctules et de 5 mètres pour les murins/oreillards en présence de lumière blanche, et à une distance de 1-2m pour les pipistrelles, la probabilité de voler plutôt du côté fermé qu'ouvert atteint 100% ou presque (Figure 3). Ces résultats sont d'autant plus surprenants que les groupes des pipistrelles et sérotines/noctules ne sont pas connus comme des groupes ayant pour habitude de voler en milieu encombré, ce qui tend à souligner la force de la contrainte exercée par la lumière sur ce type de continuité écologique.

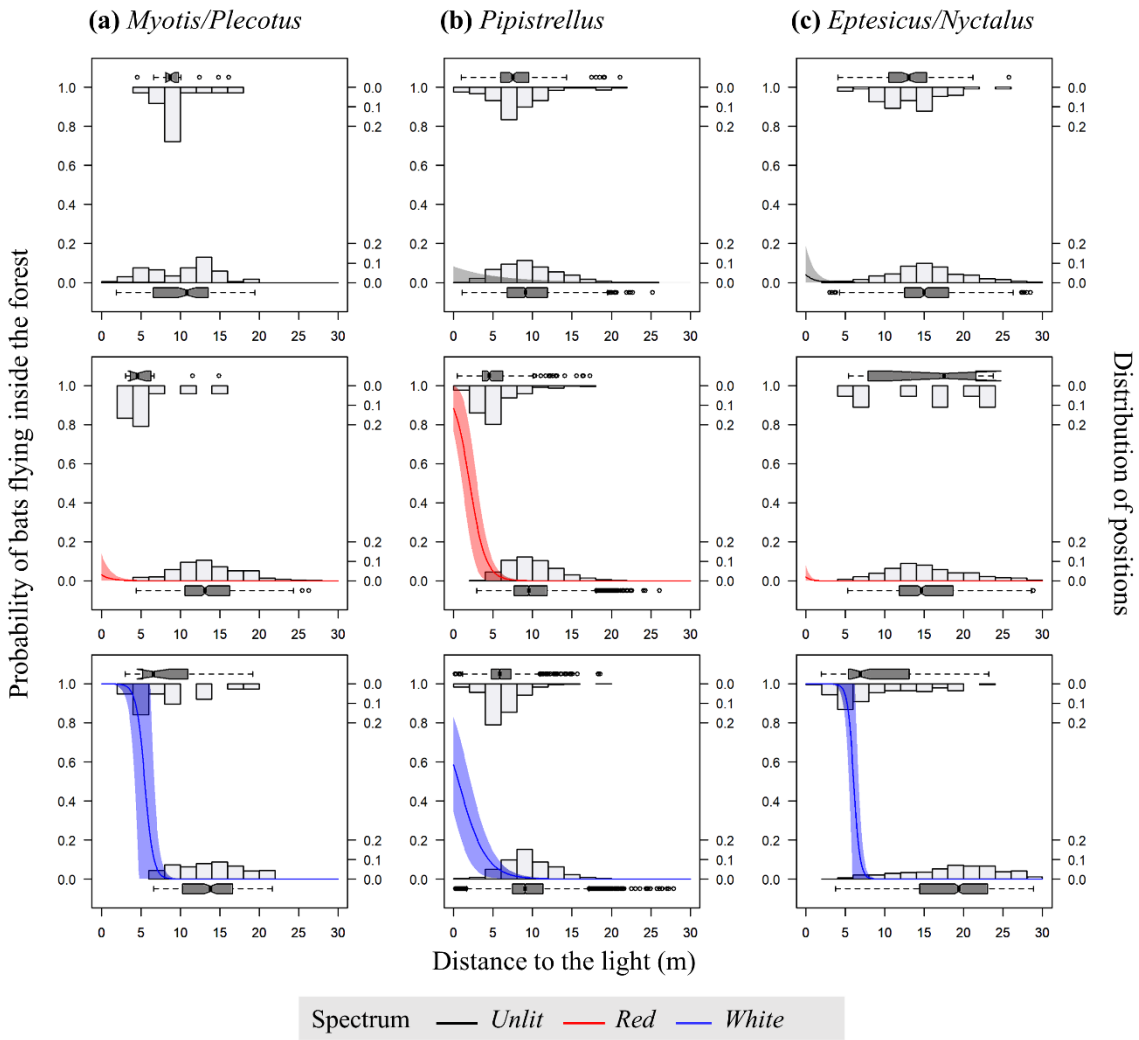

Figure 3. Probabilité qu'une chauve-souris soit en sous-bois plutôt qu'en milieu ouvert en fonction de la distance à la lampe et du type de spectre. Ce résultat fait partie de la publication 3 (voir liste des publications en fin de rapport).

Ces résultats corroborent l'importance de considérer des effets d'échelles de l'éclairage artificiel déjà connus dans la littérature et illustrés par l'antagonisme des conclusions selon l'échelle étudiée : alors que l'éclairage artificiel se traduit localement chez certaines espèces de chiroptères par une augmentation de l'abondance à proximité des lampadaires (Pipistrelles), son impact est négatif à l'échelle du paysage. Nos résultats montrent de la même manière qu'en dépit d'une apparente

attraction locale de la lumière observée chez certains groupes comme les pipistrelles, l'éclairage artificiel (comme ici en lisière) engendre des modifications comportementales des individus, des déplacements de vol vers des milieux présumés « sub-optimaux » ce qui se traduit probablement par un coût énergétique plus important et donc possiblement sur la dynamique des populations. Nos résultats mettent également en évidence que les d'impacts sur les pipistrelles se produisent aussi bien en dessous du halo lumineux qu'au-dessus, et seulement au-dessus pour les sérotines/noctules. Ainsi l'orientation des lampadaires vers le sol ne supprime pas les effets négatifs de la lumière sur la faune volant au-dessus des lampadaires. En revanche les résultats ouvrent une voie prometteuse vers la réduction des impacts de l'éclairage étant donné que les impacts observés semblent se produire principalement du côté vers lequel le lampadaire est dirigé. Ce résultat souligne l'importance de focaliser l'éclairage en direction des zones (habitats) les moins favorables aux chiroptères. Les distances d'impact observées semblent également relativement faibles, dans notre cas de l'ordre de 10 à 20m, et très dépendantes de l'augmentation de l'intensité, qui dépend elle-même de la distance à la lampe mesurée sur les sites (Figure 4). Ce résultat souligne l'intérêt de considérer la réduction d'intensité comme un levier important pour diminuer les distances d'impact.

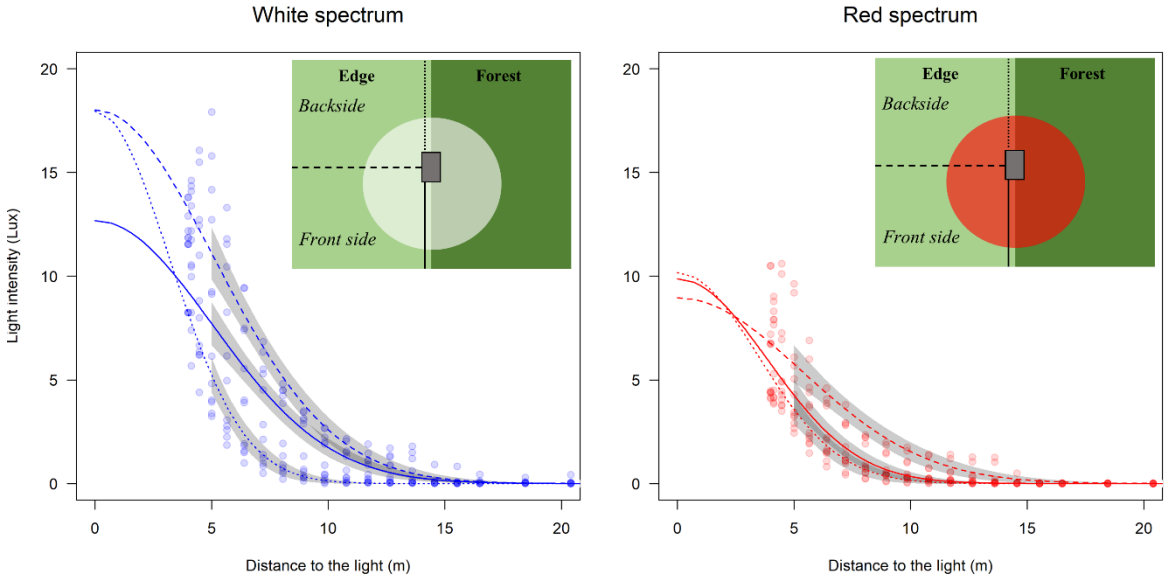

Figure 4. Représentation des mesures d'intensité lumineuses effectuées sur les sites pour les lampes blanches et rouges, en fonction de la localisation par rapport au lampadaire (en face, derrière ou de côté). Les deux cercles schématisent l'orientation et la portée des lampes au sol. Ce résultat fait partie de la publication 3 (voir liste des publications en fin de rapport).

Etude des traversées du halo (Hypothèse B).

La seconde expérimentation portait sur les effets des spectres de lumière sur le nombre de traversées du halo lumineux le long de lisière, et donc en d'autres termes sur les effets du type d'éclairage sur la connectivité fonctionnelle de ces lisières. Les analyses ont donc porté sur la proportion d'individus qui franchissent le premier enregistreur d'un des côtés de la lampe et qui franchissent également le deuxième, soit la proportion d'individus traversant totalement le halo lumineux (sans demi-tours) relativement au nombre d'individus ne le franchissant pas entièrement. Ce dénombrement des traversées est réalisé grâce à la synchronisation des enregistreurs acoustiques de part et d'autre du lampadaire (espacés de 40 mètres l'un de l'autre) sous l'hypothèse d'une vitesse de vol X « attendue » de traversée des 40 mètres séparant les deux enregistreurs. Afin d'évaluer l'effet de la lumière sur différents comportements de vol, à savoir du

vol rapide de transit ou de recherche alimentaire plus lent, la proportion de traversées totale a été mesurée selon différentes vitesses de vol attendues et donc différents sous-jeux de données. Au total plus 2 657 traversées totales (traversée des deux enregistreurs) ont été mesurées et plus de 10 000 non traversées (individus en vol) pour les 3 mêmes groupes de chiroptères que ceux étudiés précédemment.

Les résultats montrent tout d'abord que d'une manière générale, l'activité (utilisé comme proxy de l'abondance) des Pipistrelles est plus importante à proximité de lampes vertes et blanches que de lampes rouges ou témoin (Figure 5a), que l'activité des Murins/Oreillards est beaucoup plus basse en présence de lumière que que-soit le spectre testé (Figure 5b), et que l'activité en Sérotines/Noctules est plus importante en présence de lumière blanche et verte, puis de rouge comparativement aux témoins (absence d'éclairage) (Figure 5c). Ces résultats confirment que ces espèces localement attirées par la lumière sont plus abondantes en présence de lumière, le vert et blanc ayant des effets similaires, mais que les espèces moins tolérantes (Murins et Oreillards dans notre étude) sont nettement moins abondantes en présence de lumière quel que soit le spectre. Ce résultat est important car une étude publiée sur ces mêmes sites expérimentaux faisait état pour ce groupe d'espèces que la lumière rouge équivalait à des conditions nocturnes (Spoelstra et al., 2017).

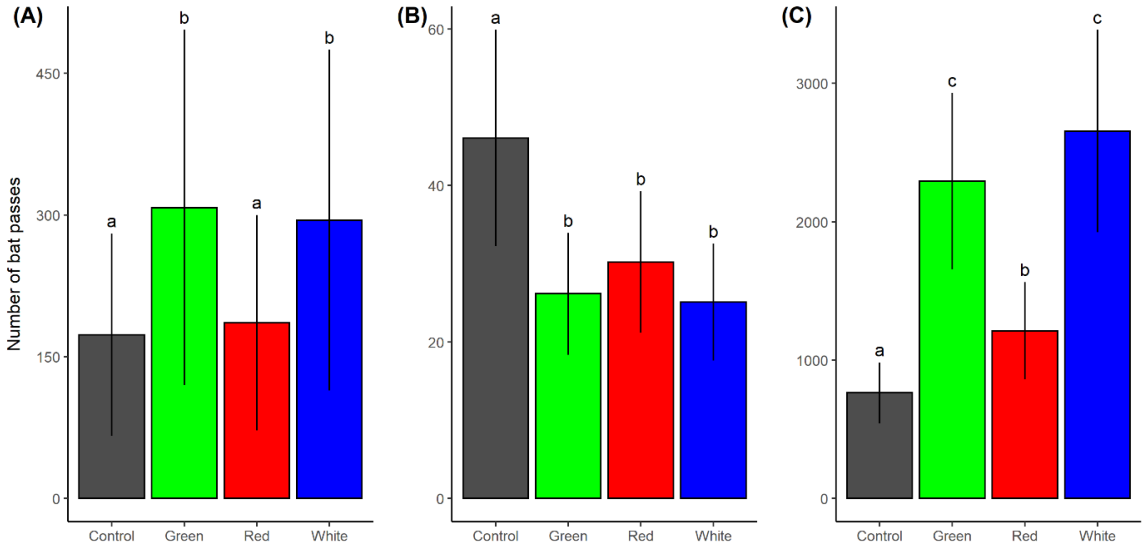

Figure 5. Représentation des niveaux d'activité (nombre de passages de chauves-souris enregistrés indépendamment des traversées) pour les Pipistrelles (A), les Murins/Oreillards (B) et les Sérotines/Noctules (C), sur les sites en fonction de la couleur d'éclairage : témoin (gris), vert, rouge et blanc. Ce résultat fait partie de la publication 4 en préparation (voir liste des publications en fin de rapport), et d'un rapport de Master 2 (Iuna Thomas).

Il faut cependant noter que des effets d'attraction locale, comme ceux que nous décrivons ici, pour les Pipistrelles et Sérotines/Noctules sont probablement le reflet d'une concentration des insectes, proies des chiroptères, sous les sources lumineuses (Owens et al. 2018). Ainsi cette apparente abondance locale reflète-elle très probablement un effet attractif de la lumière vis-à-vis des insectes des habitats environnants, et donc un effet « puit » (piège écologique) sur ces taxons, associé au risque élevé de « vidange » des habitats adjacents de ces proies. Cette attraction locale, souvent létale pour les insectes, se traduit très probablement par des effets négatifs majeurs sur de plus larges échelles spatiales et temporelles pour ces insectes et donc pour les populations d'espèces prédatrices, qu'elles soient bien sûr peu tolérantes à la lumière (Murins et Oreillards) qu'apparemment tolérantes. Cet effet apparemment « positif » de la lumière sur l'abondance locale de chauves-souris révèle ainsi plus probablement un effet attractif local très différent de l'effet global négatif, à moyen-long terme, à l'échelle des populations.

L’éclairage a un effet significatif sur la probabilité de traversée d’une zone par les Pipistrelles et ce quel que soit le spectre. La probabilité de traversées totales est en effet significativement plus faible dans les sites éclairés que non éclairés quelle que-soit la couleur chez les Pipistrelles volant à des vitesse moyennes à très rapides c’est à dire en déplacement (Figure 6a). Ainsi selon nos résultats, l’’éclairage en blanc, rouge et vert le long des lisières forestières limiterait donc la fonctionnalité de ces corridors pour le déplacement des Pipistrelles. Une étude publiée sur ces mêmes sites expérimentaux et étudiant la quantité d’activité avait conclu que les sites témoins et rouges étaient moins attractifs pour ce groupe, le rouge se rapprochant donc de conditions nocturnes. Nos résultats apportent donc de réels éléments de compréhension supplémentaires qui viennent pondérer certaines conclusions uniquement basées sur l’activité (abondance) et non sur l’usage du corridor. Aussi, l’augmentation du taux de traversées dans le cas des vitesses de vol faibles, c’est-à-dire dans le cas de comportements de chasse, pourrait signifier que le bénéfice alimentaire produit par la présence de lumière blanche (attraction forte des insectes proies) pourrait contrebalancer l’augmentation perçue des risques de prédation lors de la traversée du halo.

Les lumières blanche et verte semblent aussi exercer un effet barrière pour les Sérotines/Noctules mais uniquement pour celles volant à des vitesses faibles. Ce résultat suggère qu’elles ne sont majoritairement affectées que lorsqu’elles chassent et non lors de leur déplacement (vol rapide) (Figure 6b). La lumière rouge quant à elle semble au contraire favoriser les traversées lors de phases de chasse. Elle correspond probablement à une situation où la perception d’un risque de prédation est réduite comparativement à une situation de lumière blanche. Cette lumière rouge, comparée à l’absence de , se traduit probablement parallèlement par une augmentation de l’abondance en proies en particulier de certains coléoptères connus pour être attirés par la lumière rouge et pour être très consommés par ces espèces.

Concernant les Murins/Oreillards, un groupe connu pour éviter les situations éclairées; nous n’avons pas détecté d’effets significatifs des types de couleur des lampadaires sur la probabilité de traversée du halo lumineux, en raison du très faible nombre de traversées détectées en présence de lumière. L’activité (abondance) est ainsi quasiment relictuelle lorsque le site est éclairé quelle que-soit la couleur, ce qui limite l‘étude de l’effet de l’éclairage sur les mouvements. D’après nos observations, la lumière a ainsi pour effet la désertion des zones éclairées par ces espèces. Dans le contexte général de développement de l’éclairage artificiel, cette réponse apparait comme particulièrement inquiétante du point de vue de la conservation.

Enfin, l’effet barrière peut parfois être plus marqué lorsque les individus proviennent de l’arrière du lampadaire comparativement à ceux arrivant de l’avant, notamment concernant les Pipistrelles (Figure 6a). Une explication possible serait la suivante : sur ce type de site éclairés où la lumière occasionne des perturbations comportementales, les individus s’approcheraient des lampes plutôt par le côté le moins éclairé afin de rester le plus longtemps possible dans l’obscurité.

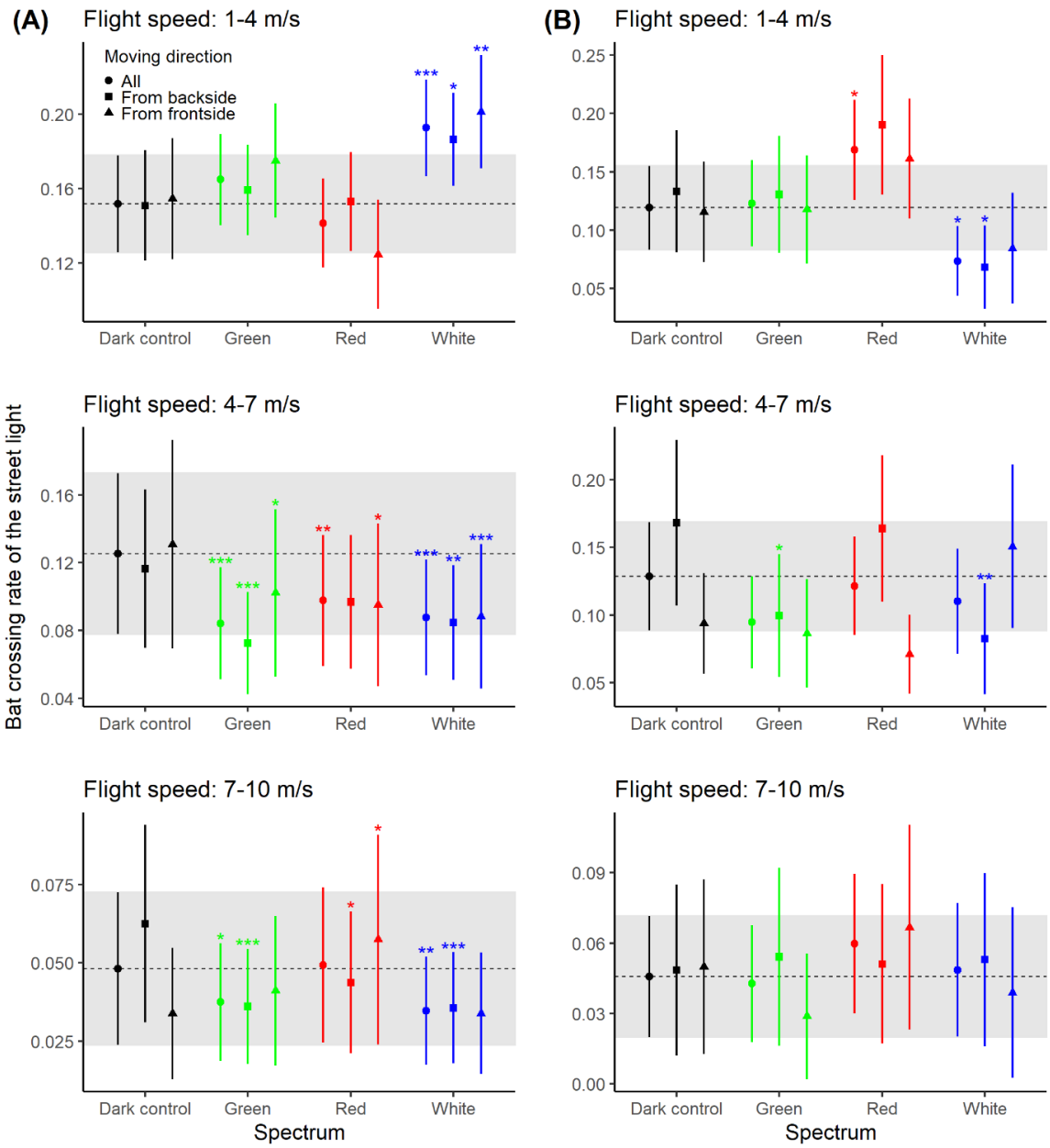

Figure 6. Représentation des taux de franchissement du halo lumineux par les Pipistrelles (A) et Sérotines/Noctules (B) en fonction du côté par lequel arrive l'individu et du type de lampe, et ceci pour trois grandes catégories de vitesse de vol attendue. Ce résultat fait partie de la publication 4 en préparation (voir liste des publications en fin de rapport), et d'un rapport de Master 2 (Iuna Thomas).

SYNTHESE DES RESULTATS

• La présence de lumière blanche ou verte se traduit par une augmentation de l'activité locale des Pipistrelles et des Sérotines/Noctules. Cet effet déjà connu est à mettre en relation avec l'effet attractif de ces valeurs de spectre lumineux sur les insectes, proies de ces espèces. Cet effet attractif local peut masquer des effets négatifs à moyen - long terme à l'échelle de populations

• La présence de lumière, quel que soit le spectre, se traduit par une activité (abondance) beaucoup plus faible des Murins/Oreillards.

• En présence de lumières banches comme rouges, les Pipistrelles et Murins/Oreillards tendent à voler dans un habitat à la végétation plus dense, potentiellement plus contraignant énergétiquement pour ces espèces.

• La présence de lumière se traduit par « un effet barrière » au déplacement des Pipistrelles quelle que-soit la couleur de la lampe. Cet effet de diminution de la traversée du halo lumineux est aussi observé chez les Sérotines/Noctules, en chasse, dans le cas de lumière blanche.

• La présence de lumière, quelle que-soit la couleur, se traduit par une diminution majeure de l'activité des Murins/Oreillards. Aucune traversée du halo n'est alors détectée.

IMPLICATIONS OPERATIONNELLES

• L'étude révèle que la lumière rouge ne permet pas de supprimer les perturbations comportementales et les effets barrières, ou bien dans une très faible mesure.

• L'orientation des lampes vers les sites les moins fréquentés par les chauves-souris et la diminution drastique de l'intensité lumineuse semblent être des moyens efficaces pour minimiser la distance d'impact de l'éclairage sur le comportement de vol (c'est-à-dire le comportement de « fuite » vers des habitats plus encombrés, potentiellement suboptimaux pour les espèces de milieux ouverts).

• Cependant l'effet barrière semble se produire quelle que-soit l'orientation de la lampe. Selon notre étude, la suppression ou l'extinction des lampes apparait donc comme les principaux leviers pour minimiser les effets barrière de la lumière.

PERSPECTIVES

• Afin d'améliorer la connectivité, il serait pertinent de mieux comprendre dans quelle mesure la diminution de la portée du halo du lampadaire, c'est-à-dire la diminution de l'intensité lumineuse, en fonction de chaque couleur (valeur de spectre), réduit cet effet barrière (hypothèse B). Le design proposé ici pourrait être repris.

• Ces expérimentations pourraient être répliquées pour évaluer l'effet des durées d'éclairage selon ces différents paramètres au cours de la nuit.

5. AXE 2 : Effet de l'éclairage (LED) des ponts sur les mouvements de chiroptères le long des canaux(Canal du Midi)

5.1. Contexte

En complément d'études via des dispositifs expérimentaux (Pays Bas), l'enjeu était d'évaluer dans un contexte réel de continuités écologiques soumises à l'action de l'Homme, l'impact de l'éclairage artificiel sur les mouvements des chiroptères, et donc d'évaluer les impacts sur la connectivité fonctionnelle de corridors écologiques traversant des agglomérations, comme le canal du midi.

L'objectif étant de produire des recommandations adaptées et opérationnelles de réduction des impacts potentiels, il était nécessaire de confronter les leviers d'action identifiés en faveur des chiroptères aux contraintes réglementaires et aux perceptions des usagers et des gestionnaires de l'éclairage public. Dans ce contexte, nous avons donc choisi de mener sur les mêmes sites, enquêtes en sciences humaines et sociales (présenté en axe 3) et étude en écologie (axe ci-présent). Cet objectif a par conséquent fortement conditionné le choix des sites qui devaient à la fois être des sites fréquentés par le public, soumis à une gestion de l'éclairage, et en même temps présenter une activité suffisante de chiroptères. Surtout l'enjeu étant d'évaluer l'impact de l'éclairage sur les déplacements des chiroptères, il convenait de disposer de situations permettant d'isoler cet aspect, c'est-à-dire de le distinguer d'autres effets de l'environnement. Nous avons donc recherché et identifié des sites suffisamment différents dont les variables environnementales (habitat) et variables de lumière n'étaient pas corrélées. Dans cet objectif le contexte du Canal du Midi au cœur de la ville de Toulouse s'est révélé défavorable puisque les types d'éclairages (LED, sodium haute et basse pression) étaient associés à des caractéristiques locales, situation ne permettant pas d'identifier en nombre suffisant des sites permettant d'isoler les effets relevant des types d'habitats et ceux relevant de la lumière: En effet, les éclairages sodium étaient quasi exclusivement associés à une ripisylve de type platane alors que les éclairages en lumière blanche, dont les LEDs, étaient plutôt trouvés en milieux ouverts ou le long de ripisylves plus denses.

Dans ce contexte, nous avons choisi d'orienter l'étude vers l'évaluation de l'effet barrière potentiel de l'éclairage inférieur et des façades des ponts construits sur le canal et au cœur de l'agglomération sur le déplacement des chauves-souris. Focaliser l'étude sur les proximités de ponts nous a en effet permis de choisir des sites semblables dont seule la présence (ou l'absence) d'éclairage de la façade et du dessous des ponts était le facteur discriminant. Ceci nous a ainsi permis de décorréler les effets liés à l'éclairage de ceux liés à l'habitat (l'habitat ne variant que très peu entre les sites sélectionnés, Figure 7).

Les canaux, en tant qu'infrastructures linéaires vertes et bleues traversant les villes constituent potentiellement d'importants corridors fonctionnels, permettant à la fois aux chauves-souris de se déplacer et de se nourrir, dans des matrices relativement hostiles comme le milieu urbain dense. Or bien que suspecté d'être important, leur rôle de connectivité pour les chiroptères est encore mal connu et plus encore l'effet barrière au déplacement potentiellement joué par des ponts éclairés sur les cours d'eau.

5.2. Méthodologie

Deux expériences ont été réalisées, chacune sur 8 jours. Dans la première nous avons trajectographié en 3 dimensions chaque passage de chauves-souris aux abords des ponts les trois premières heures de chaque nuit (voir illustration du bas de la figure 7). Un pont par nuit a été échantillonné, en alternant une nuit sur deux un pont éclairé et un non éclairé. Les ponts éclairés et non éclairés ont été choisis de manière à se situer dans des contextes urbains autant similaires que possible, en particulier en terme d'intensité d'éclairage des sites de manière à limiter l'effet de facteurs confondants.

La deuxième expérience consistait à disposer un enregistreur d'ultrasons de chauves-souris de part et d'autre de 6 ponts (4 éclairés dont 2 avec extinction totale et 2 avec extinction partielle à 1h du matin, et 2 non éclairés) simultanément chaque nuit, en enregistrant des nuits complètes, pour un total de 54 sites échantillonnés. Cette expérience, très similaire à la première, visait à mieux évaluer l'impact de l'éclairage sur le franchissement des ponts par les chauves-souris si la première expérience menée par trajectographie était non concluante par manque de données. De ce fait, nous n'avons à ce jour pas valorisé les données issues de cette deuxième expérimentation dans la mesure où la première expérience a permis d'obtenir suffisamment de données et d'émettre des conclusions.

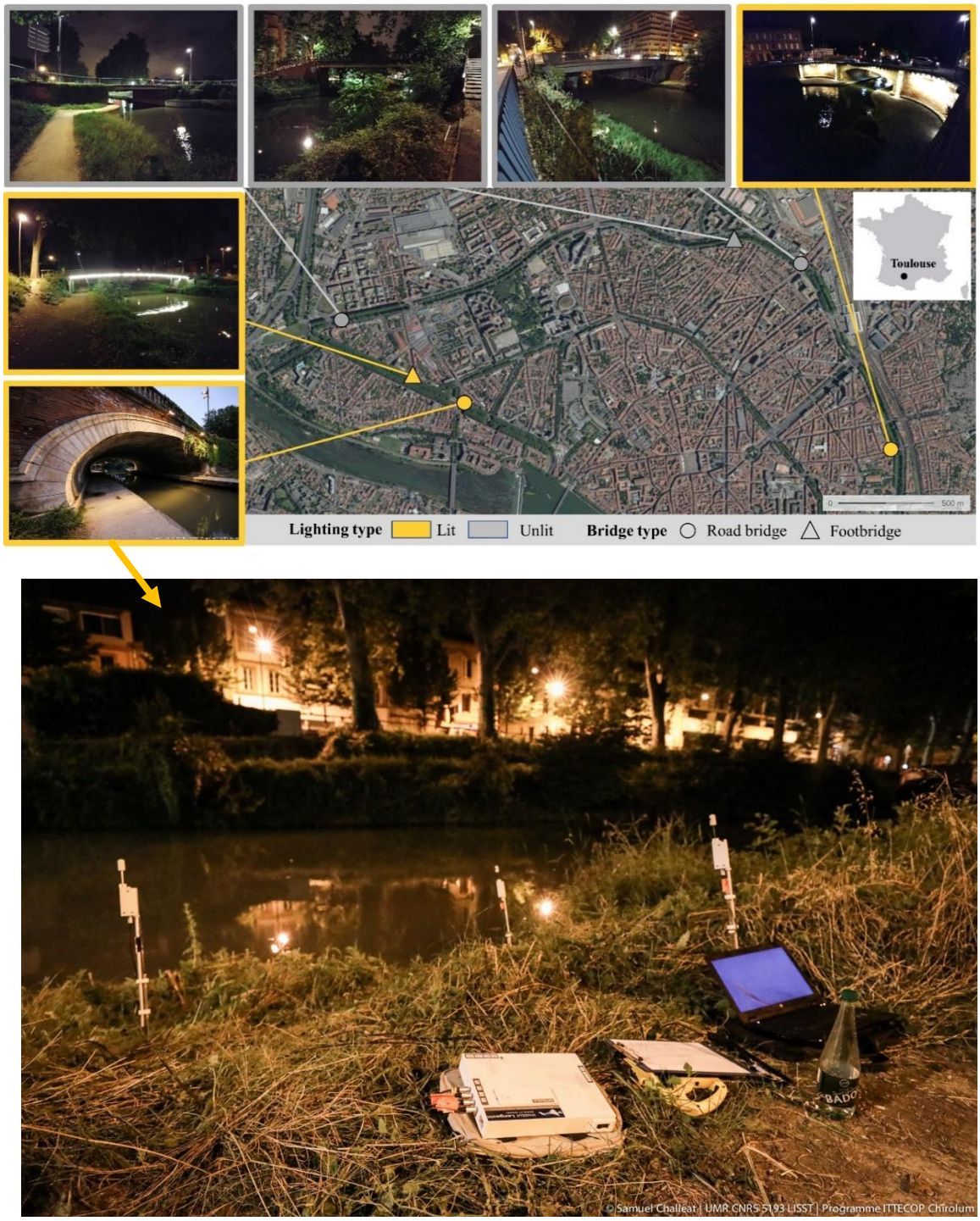

Figure 7. Carte de la localisation des ponts étudiés (deux passerelles piétonnes et quatre ponts routiers) et photographies des sites (en jaune les ponts éclairés, en gris les ponts non éclairés). La photographie du bas illustre le matériel utilisé, antenne de trajectographie, pour l'étude d'un des sites.

5.3. Résultats

Nous avons globalement enregistré 1.7 fois moins de passages de chauves-souris (Pipistrelles) à proximité des ponts éclairés que non éclairés (respectivement 386 contre 644). Ces passages nous ont permis de reconstruire 2036 localisations en 3 dimensions pour les ponts non éclairés et 151 pour les ponts éclairés.

Les localisations étaient en moyenne 1.6 m plus éloignées des ponts éclairés comparativement aux ponts non éclairés (Figure 8 a). Cette perturbation (éloignement anomal au pont éclairé comparativement au pont non éclairé) a été détectée à partir d'une distance d'environ 20 mètres des ponts éclairés (Figure 8 b).

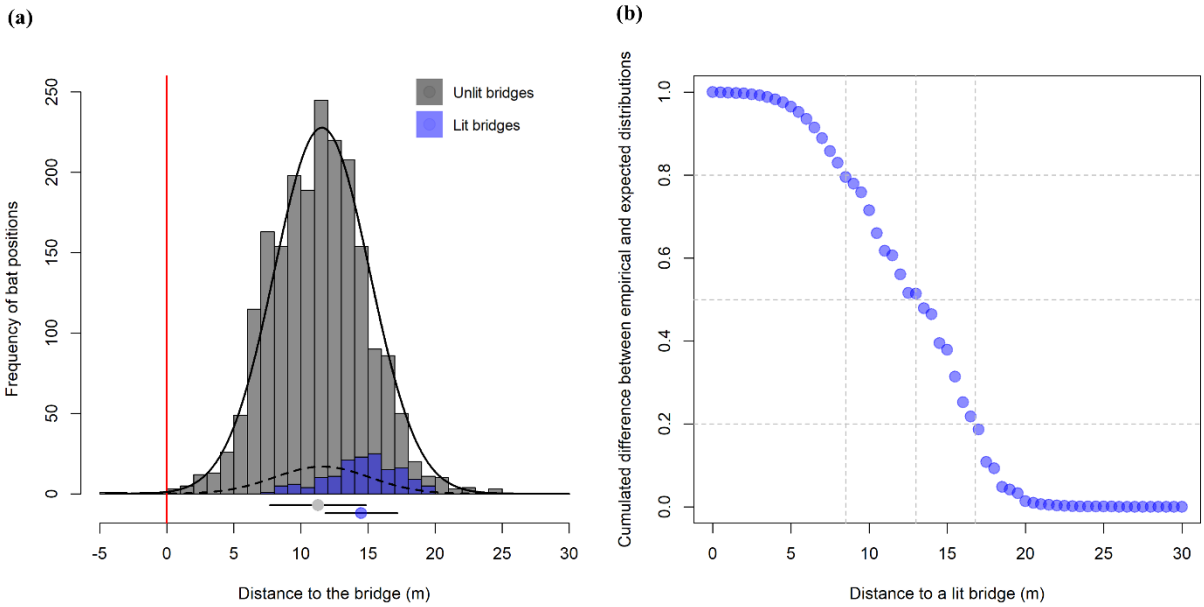

Figure 8. Distribution des positions de chauves-souris en 3D en fonction de leur distance au pont (matérialisé par la ligne verticale rouge), en gris pour les ponts non éclairés et en bleu pour les pont éclairés (a). Le panel de droite (b) montre les écarts cumulés en termes de distance au pont, entre les positions en 3D sur les ponts éclairés et la distribution attendue en condition non éclairée.

Alors que les positions de chauve-souris étaient nombreuses près des ponts non éclairés, aucune position n'a pu être détectée à moins de 7.9 m des ponts éclairés (Figure 8 a). L'étude ne permet cependant pas de savoir quelle est la modification de trajectoire de vol des chauves-souris près de ponts éclairés, à savoir si elles effectuent des demi-tours de manière à éviter la zone éclairée ou si elles le contournent via des trajectoires hors de portée du matériel d'enregistrement. Les ponts étant toujours environnés par de forts éclairages urbains, et le canal constituant généralement le seul secteur sombre, il est peu probable que les individus franchissent le pont éclairé. Quelle que soit le type de modification de trajectoire, l'éclairage d'un pont exerce un effet barrière, conduisant a minima les individus à les contourner en passant par des zones moins éclairées. Cette modification des trajectoires dans le cas de ponts éclairés engendre nécessairement des dépenses énergétiques supplémentaires, conduit les individus à se déplacer dans des habitats suboptimaux (matrice urbaine).

Alors qu'en se rapprochant de ponts non éclairés, les individus tendent à ralentir (probablement du fait de la perception de l'obstacle et de la nécessité de l'éviter), l'inverse est constaté dans le cas des ponts éclairés (Figure 9). Ce comportement d'accélération au fur et à mesure que les individus se rapprochent du halo n'était pas forcément le comportement « attendu » en présence de source de lumière. Celle-ci se traduit en effet souvent par une concentration en insectes (phototaxie) et donc de proies pour les chauves-souris et augmente donc leur probabilité de captures. Cette activité de chasse implique des vitesses de vol plus lentes chez les Pipistrelles, ce qui laissait suggérer une diminution globale des vitesses de déplacement à proximité des ponts éclairés. Ainsi ce résultat démontre une forte perturbation comportementale se traduisant par une accélération

des vitesses de vol des chauves-souris, en moyenne 2.2m/s de plus, à proximité des ponts éclairés (Figure 9).

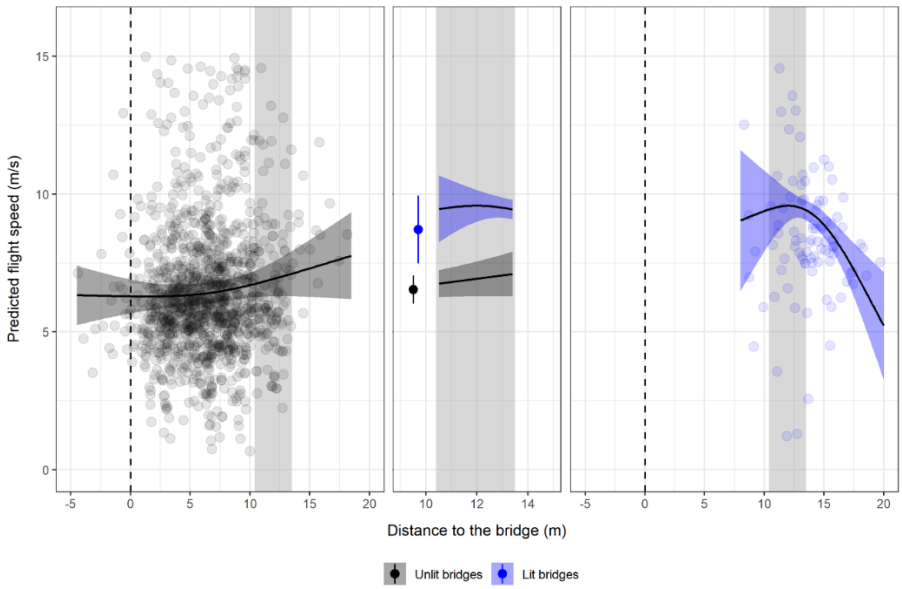

Figure 9. Evolution des vitesses de vol en fonction de la distance au pont (matérialisé par les lignes verticales discontinues) pour les ponts non éclairés (gris) et les ponts éclairés (bleu), avec un zoom au centre sur la partie grise représentant l'intervalle de distances au pont dans lequel les données entre ponts éclairés et non éclairés sont pleinement comparables. Ce résultat fait partie de la publication 1.

Dans le cadre de cette étude, nous n'avons pas pu mettre en place un design expérimental permettant de tester l'effet du spectre et de l'intensité lumineuse des éclairages des ponts sur les localisations des chiroptères, en raison de la disponibilité en sites et en matériel. Cependant, l'analyse séparée des positionnements à proximité des ponts éclairés par des LEDs blanches (passerelle piétonne, Figure 10 a) et des ponts éclairés avec des couleurs plus chaudes (Figure 10 b) met en évidence des patrons de distribution spatiale des localisations de chauves-souris identiques.

Bien sûr l'enjeu serait d'évaluer désormais dans quelle mesure la diminution de l'intensité des éclairages et le choix de couleur plus chaudes permet d'atténuer cet effet « barrière » de l'éclairage des ponts. Cependant, étant donnés les résultats de l'expérimentation menée aux Pays-Bas, montrant que même les lumières rouges et de moindre intensité perturbent fortement le comportement des espèces, il est probable que cette mesure de modification des paramètres lumineux de l'éclairage inférieur et des façades des ponts n'ait qu'un effet très limité sur l'amélioration de la connectivité fonctionnelle : Aussi recommandons nous une extinction de l'éclairage des ponts et a minima, de l'éclairage inférieur et des façades des ponts.

Cette étude a fait l'objet d'un article publié dans Animal Conservation (https://doi.org/10.1111/acv.12635).

(a) (b)

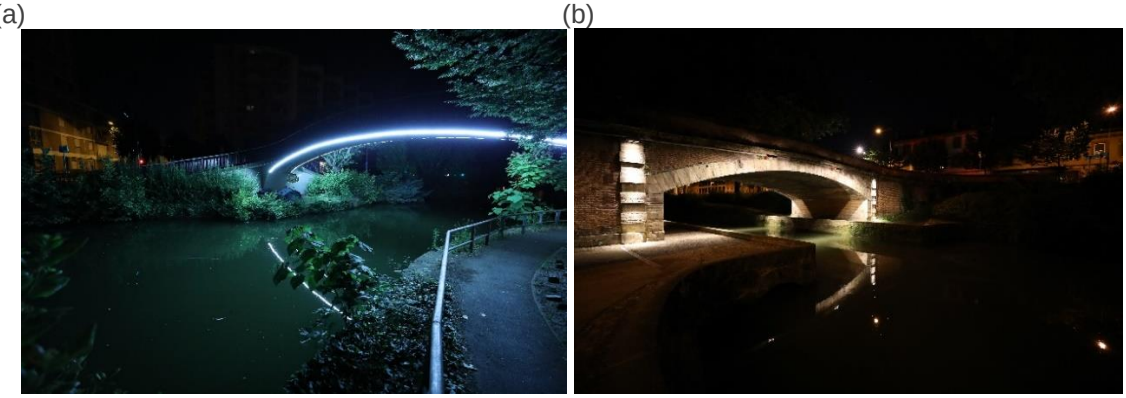

Figure 10. Illustration de la passerelle éclairée échantillonnée (a) ainsi que d'un des ponts éclairés échantillonné (b).

SYNTHESE DES RESULTATS

• Une forte diminution d'abondance des chauves-souris est notée à proximité de ponts éclairés comparativement aux ponts non éclairés sur le canal du Midi.

• Les chauves-souris se tiennent à plusieurs mètres des ponts éclairés, à savoir au moins 8 mètres, alors qu'elles volent à proximité immédiate de ponts non éclairés.

• L'éclairage des ponts se traduit par un effet barrière marqué, au déplacement des chiroptères engendrant a minima des comportements de contournement importants (le matériel utilisé ayant une portée de 30 mètres environ) ou de demi-tours.

• Des individus volent beaucoup plus rapidement à proximité des ponts éclairés que non éclairés, ce qui engendre potentiellement des pertes énergétiques.

• Les impacts de l'éclairage sur ces comportements semblent identiques qu'il s'agisse de types d'éclairage blanc ou jaune/orange.

• Aussi considérons nous que ces résultats mettent en évidence un effet négatif de l'éclairage des ponts sur la connectivité fonctionnelle le long des cours d'eau et en particulier le long de ce type d'ILTs.

IMPLICATIONS OPERATIONNELLES

• L'étude ne permet pas de réaliser des préconisations autres que de supprimer ou d'éteindre l'éclairage des ponts si l'on souhaite limiter au possible ses effets négatifs sur la connectivité fonctionnelle le long des cours d'eau (pour les chiroptères). La période d'activité maximale des chauves-souris correspondant globalement au début de la nuit (premières heures), l'extinction nocturne à une heure plus avancée ne devrait avoir qu'un effet limité sur la réduction de l'impact.

PERSPECTIVES

• Afin de réduire cet effet « barrière », il serait pertinent d'évaluer dans quelle mesure la diminution de la portée de l'éclairage des façades des ponts (de l'ordre de 10 à 20 m dans notre étude), via notamment la diminution de son intensité, la réorientation des lampes, et le choix de couleur plus chaudes, permettent effectivement d'atténuer cet effet.

• De même, serait-il pertinent d'évaluer si l'extinction de l'éclairage des rues attenantes au canal et au pont se traduit par une amélioration de la connectivité fonctionnelle, en facilitant le déplacement des chauves-souris le long de ces ILTs.

• Etant donnés les résultats obtenus sur les sites expérimentaux aux Pays-Bas, la modification du spectre des éclairages, et l'adoption de couleurs plus chaudes telles que le rouge, ne devrait pas garantir une amélioration nette de la connectivité.

6. AXE 3 : Identifier les contraintes réglementaires et caractériser la perception des dimensions socio-écosystémiques de l'éclairage public par les gestionnaires et les usagers

6.1. Contexte

L'éclairage public est un outil d'aménagement structuré par différents enjeux : sécurisation des biens et des déplacements, des personnes dans leurs usages nocturnes de l'espace, ou encore valorisation esthétique du bâti. Il génère aussi des effets de pollution qui altèrent les conditions de vie des espèces vivantes humaines et non humaines. Aussi, l'atteinte à la biodiversité est-elle un enjeu qui se greffe à la conception et la mise en œuvre de l'éclairage public. L'éclairage en tant qu'outil d'aménagement apparaît donc comme un compromis légal, technique, social et environnemental arbitré par la décision politique.

Notre questionnement rejoint la problématique générale du passage de la connaissance à l'action. Décliné dans le cadre du programme CHIROLUM, il se focalise sur la question écologique et peut être formulé comme suit : la connaissance située des ambiances nocturnes, de leur perception, mais aussi des effets négatifs de l'éclairage artificiel nocturne du point de vue écologique — et plus spécifiquement en matière d'altération des mobilités spatiales de la faune — est-elle en capacité d'influer les pratiques d'aménagements en matière d'éclairage ? Si oui comment, dans quelle mesure, par qui, avec quels outils et arguments ? C'est ce que nous recouvrons sous la terminologie "leviers d'action", ne limitant donc pas ceux-ci à de simples interventions techniques ne dépassant pas l'ajustement marginal de paramètres éclairagistes. En d'autres termes, notre travail d'enquête tente d'établir les facteurs de changements de pratiques d'éclairage au sein de la métropole toulousaine — et plus particulièrement le long de l'ILT Canal du Midi — ainsi que les freins à ces changements.

6.2. Méthodologie

Quatorze entretiens semi-directifs auprès des professionnels en charge de l'éclairage public et de l'aménagement de la zone d'étude ont été menés courant 2018 et 2019, qui ont permis d'aborder plusieurs questions présentées ici de manière non exhaustive :

- Quels sont les critères qui déterminent leurs choix de candélabres et de types de lampes, et quelles sont leurs marges de manœuvre ?
- Comment hiérarchisent-ils les enjeux liés à la sécurité, l'écologie, l'énergie, et le bien-être des usagers ?
- Quelles contraintes et potentiels « conflits » identifient-ils dans la mise en œuvre de mesures pour réduire les impacts de l'éclairage sur la biodiversité ? Que seraient-ils prêt à mettre en œuvre ?
- Quel est leur niveau de connaissance sur la pollution lumineuse ?

Trois objectifs ont guidé le déroulement des entretiens. Il s'agissait de définir (i) la répartition des compétences et les conditions de la gouvernance du canal, (ii) les rôles attribués à l'éclairage public, et (iii) l'appréhension de l'obscurité dans cet espace urbain — schématiquement, l'obscurité est-elle appréhendée suivant ses dimensions anxiogènes ou suivant ses dimensions environnementales ?

Ces entretiens ont été menés auprès du responsable éclairage public de la ville de Toulouse, des services techniques de l'éclairage, des élus en charge de l'environnement, de l'urbanisme, de la prévention et sécurité, du tourisme et du patrimoine, ainsi qu'auprès des prestataires de service. Lors de ces entretiens, notre grille était la suivante :

- Qu'est-ce que le canal du Midi pour vous ? Qu'est-ce qu'il représente pour vous ? Quelles sont ses fonctions ? À quoi sert-il ?
- Vous participez à l'entretien et à la gestion du canal du Midi, pouvez-vous décrire votre activité. Comment est-elle organisée ? Comment fonctionne le service dont vous êtes responsable, en termes de planification, de coordination des tâches au sein du service et entre différents services ?
- Connaissez-vous la biodiversité qui longe le canal ? Comment la biodiversité existant sur et le long du canal est-elle prise en compte par vos services ?
- Comment déclinez-vous concrètement les dispositions de l'art L110-1 du Code de l'environnement ?
- Connaissez-vous les effets de la pollution lumineuse sur les espèces vivantes ? Qu'en faites-vous en matière d'éclairage public ?
- Comment prenez-vous en compte la biodiversité nocturne au regard des activités sociales nocturnes ?
- Le respect de la biodiversité nocturne relève-t-il d'un service *ad'hoc* ou est-ce un souci transversal aux services ?
- Comment cette transversalité, si elle existe, s'organise-t-elle ? Comment est-elle mise en pratique ?
- Que signifie la mise en lumière du patrimoine ? De quel patrimoine parle-t-on ? Le patrimoine naturel est-il pris en compte ? Comment concilier mise en lumière du patrimoine et lutte contre la pollution lumineuse ?
- Le long du canal du Midi, 70 mats LEDs vont être installés (voir : https://actu.fr/occitanie/toulouse_31555/eclairage-public-ce-qui-va-changer-a-toulouse-dici-2018_3528672.html) : quel équilibre au sein du socio écosystème ? Sécurité et Biodiversité ?

6.3. Résultats

Les personnes rencontrées

Tableau 1. Synthèse des services et fonctions des personnes rencontrées dans le cadre de l'axe 3.

Service & fonction(s) au sein du service	Personne(s) rencontrée(s)
Ville de Toulouse ● Conseiller Municipal Délégué en charge de l'éclairage public ● Responsable domaine éclairage public	- Émilion Esnault - Joël Lavergne (deux entretiens menés)
Toulouse Métropole ● Direction de l'Environnement ● Urbanisme et de l'Environnement ● Voie Publique ● Espaces Verts ● Circulation et des Transports	- Laurence Berasategui - Loïc Gascon - Pierre Cambon - Bénédicte Sarramon - Yannick Even - Catherine Frustie-Cocquerez
Direction territoriale Sud-Ouest de Voies navigables de France (VNF), Responsable du Bureau Environnement & Paysages	- Émilie Collet
France nature environnement (FNE) Midi-Pyrénées (fédération d'associations de protection de la nature, de l'environnement et du cadre de vie)	- Émilie Marsaud - Elliot Shaw
Habitants porteurs d'une démarche participative de construction de nichoirs pour chauve-souris	- Christophe Carbonneaux + 3 voisins (groupe initiateur de la démarche)
Acteur militant du *Dark-sky movement*	- Sébastien Vauclair

L'éclairage public le long du canal du Midi : une territorialisation incomplète

L'éclairage public est le fruit d'un compromis d'aménagement tiraillé entre des injonctions contradictoires : sécuriser les biens et les personnes, réaliser des économies budgétaires, réduire la consommation d'énergie par un renouvellement des techniques, mettre en valeur le patrimoine bâti, tout en luttant contre la pollution lumineuse pour protéger la biodiversité ordinaire. Cet enjeu mis à l'agenda politique par le Grenelle Environnement en 2007 trouve sa traduction législative dans les articles 583-1, L.583-2 et 583-5 du code de l'environnement en 2010. Il faudra cependant attendre sept ans pour que l'État, suite à un recours devant le Conseil d'État intenté par trois associations de défense de l'environnement[1], prenne les dispositions réglementaires — arrêté du 27 décembre 2018 — pour une application pleine et entière de la loi à partir du 1er janvier 2020. C'est dans ce contexte institutionnel incertain que nous avons mené notre enquête pour identifier un éventuel tournant écologique dans les pratiques de l'éclairage public du canal du Midi à Toulouse.

Cette infrastructure de transport multimodale traverse différents quartiers aux fonctions et ambiances urbaines contrastées (jardin japonais, quartier de la gare, zones de péniches résidentielles, lieux de prostitution, berges ouvertes sur l'espace urbain, segments végétalisés et arborés, segment minéralisé sans couvert végétal, berges fermées). L'éclairage public répond alors à des usages sociaux multiples, spatialement et temporellement différenciés, mais n'intègre pas ou peu la dimension de corridor écologique. Le territoire toulousain n'est pourtant pas neutre en terme de sensibilisation aux enjeux de la pollution lumineuse : un tissu associatif et scientifique actif qui a œuvré la création de la première réserve Internationale de ciel étoilé (Rice du Pic du Midi de Bigorre) a su créer des relations avec les édiles de la métropole, de la région et leurs services techniques pour faire de l'éclairage public un enjeu électoral qui trouvera des débouchés politiques évoluant au gré des coalitions majoritaires[2].

Toutefois le cadrage cognitif et normatif de la gouvernance de l'éclairage public du canal du Midi en milieu urbain dense sous contrainte écologique reste à définir. D'ailleurs, la seule qualification d'infrastructure linéaire de transport, toute pratique qu'elle est dans une logique fonctionnaliste, s'avère insuffisante à rendre compte de la multiplicité des usages et des valeurs dont le canal est le support. Cette multiplicité bien que légalement caractérisée n'en demeure pas moins problématique.

Par exemple, si l'article 4 de l'arrêté du 27 décembre 2018 prévoit de "protéger la faune et la flore du domaine fluvial des lumières intrusives qui perturbent les habitats et mettent en danger les trames bleues", le canal, site classé[3], peut faire l'objet de dérogations au titre de la valorisation du bâti — des ponts en particulier — et ce, même si les flux lumineux liés à la valorisation patrimoniale éclairent directement le domaine public fluvial[4]. A ces considérations s'ajoutent les exceptions liées aux enjeux de sécurisation "des zones de circulation et de stationnement en bordure de plan d'eau". On relève à cet égard, non sans ironie, la pertinence de l'expertise technocratique qui précise qu'en cas de renouvellement de ces installations, "il est fortement recommandé de réfléchir en phase projet à l'implantation des installations d'éclairage dans ces zones pour qu'elles ne soient pas dirigées vers le plan d'eau et qu'elles éclairent uniquement la zone à sécuriser". Toutefois l'écriture des prescriptions réglementaires et techniques, en accord avec les directives européennes a donné lieu à un travail concerté de définition de seuils[5], comme par exemple la

---

[1] https://www.actu-environnement.com/ae/news/pollution-lumineuse-fne-frapna-conseil-etat-28834.php4

[2] https://www.ladepeche.fr/article/2014/07/18/1920698-jean-luc-moudenc-rallumons-la-lumiere.html

[3] http://www.sudouest.vnf.fr/IMG/pdf/Classement_Canal_du_Midi_au_titre_des_Sites_cle0a1fb2.pdf

[4] On pourra consulter avec profit la qualité des photos de ponts illuminés traversant le canal du Midi mises en ligne par le service patrimoine de la mairie pour illustrer la maitrise de son plan lumière https://www.toulouse.fr/web/patrimoine/-/plan-lumiere

[5] "Ces textes sont issus d'une concertation importante entre le ministère de la transition écologique et solidaire et les principaux acteurs (associations de protection de l'environnement, collectivités territoriales, professionnels de l'éclairage, autres administrations…)"https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/arrete-du-27-decembre-2018-relatif-prevention-reduction-et-limitation-des-nuisances-lumineuses

limitation de la température de couleur des installations d'éclairage extérieur à 3000 K pour réduire la proportion de lumière bleue dans les spectres de lumière artificielle.

Compte tenu des charges financières et techniques que supposent les prescriptions réglementaires issues de l'arrêté du 27 décembre 2018, la mise en conformité de la totalité du parc d'éclairage public est étalée jusqu'en 2025. Le respect des prescriptions est l'objet d'un contrôle confié aux maires sauf pour les installations communales et à l'État pour les installations communales au titre d'une police administrative spéciale. Le non-respect des dispositions est passible d'une amende au plus égale à 750 € par installation lumineuse irrégulière.

Malgré ce dispositif réglementaire pointilleux, force est de constater, que les services techniques des collectivités que nous avons rencontrés à Toulouse et dans d'autres terrains d'enquête[6] se trouvent en difficulté quand il s'agit d'intégrer le respect de la biodiversité dans un cadrage techno-économique bien rôdé.

Les difficultés sont de plusieurs ordres. *Techniques* tout d'abord, avec un poids de l'héritage technique sur l'état actuel du parc d'éclairage (morphologie du réseau d'électrification, choix d'implantation des luminaires, hauteurs des mâts, choix des lanternes). *Professionnels* ensuite avec des pratiques des services techniques qui, si elles sont coordonnées quand il s'agit d'intervenir sur le canal et le long de la voirie, n'en restent pas moins cloisonnées — ceci étant d'une acuité particulièrement forte dans un contexte de réforme territoriale et de transfert des compétences de la ville vers la métropole dans une logique de spécialisation bureaucratique. *Scientifiques* enfin, avec une volonté de fonder la décision sur les résultats scientifiques là où, pour reprendre les termes de Jürgen Habermas, "il nous faut agir dans le savoir explicite de notre non-savoir"[7]. Cette attente envers "le savoir scientifique" est nécessaire aux services techniques pour fournir au décideur politique la capacité d'argumenter des choix auprès des administrés, mais elle est fondée sur une approche techno-politique de la science, qui prend les résultats pour des vérités, alors que les résultats n'ouvrent que des possibilités, qui sont l'objet de controverses entre différentes connaissances disciplinaires et usages expérientiels de l'espace.

Il s'agit donc d'un enjeu de gouvernance d'un socioécosytème complexe qui se heurte à la division verticale et horizontale techno-politique de l'éclairage public qui se traduit dans les logiques en silo de services sectorisés.

Cette gouvernance supposerait un changement de paradigme qui se résume à considérer l'obscurité comme une ressource socio-écologique à gérer de manière parcimonieuse et non plus seulement à combattre *via* l'usage de lumière artificielle. En d'autres termes, c'est admettre que la préservation de l'obscurité n'est pas un enjeu qui unit mais qui divise les acteurs locaux devant pourtant coopérer de manière à établir un compromis d'aménagement.

> "*Dans le cadre de l'étude paysagère Toulouse, le bureau d'études a travaillé sur la partie lumière, éclairage le long, sur des zones d'ombres un peu problématiques. Dans ce cadre-là, tout le monde a dit collectivement 'Il faut que vous preniez en compte ces questions de pollution lumineuse'. Je vous donne un exemple, c'est peut-être un peu trivial ou caricatural mais il y avait une proposition qu'on voyait sur un schéma, on voyait carrément la lumière qui allait vers l'arbre, de bas en haut, parce que 'c'est joli hein !', mais là on a dit 'ça va pas être possible !' Ce genre de truc c'est complètement contraire à toutes les logiques de pollution lumineuse, sans même parler des animaux notamment des chauves-souris qui pourraient-être directement dans l'arbre... si on met ça sous tous les arbres, enfin on va dire régulièrement le long du canal, ça va créer une pollution lumineuse qui est probablement assez dramatique quoi… Il y a eu un début de prise en compte de cet enjeu, et alors là c'est suivi par un nombre de services à Toulouse métropole… j'arrive plus à suivre !"*
>
> Chargée de mission Environnement de VNF.

Ce compromis peut se construire dans un processus de territorialisation de la gestion de cette ressource spécifique qu'est l'obscurité.

---

[6] Programme Trame Noire de l'IPAMAC (Inter-Parcs du Massif central).

[7] https://www.lemonde.fr/idees/article/2020/04/10/jurgen-habermas-dans-cette-crise-il-nous-faut-agir-dans-le-savoir-explicite-de-notre-non-savoir_6036178_3232.html

La territorialisation s'entend alors comme le processus d'objectivation située qui confronte les connaissances scientifiques aux luttes et coopérations institutionnelles, mais aussi aux savoirs vernaculaires et autres formes d'attachement aux lieux afin de les rendre opérationnelles. Dans une logique et un contexte d'incertitude, la territorialisation vise ainsi à articuler les échelles de connaissance — entendues comme l'étendue et le caractère temporel et spatial des connaissances détenues par les individus et les collectifs — aux échelles spatiales, institutionnelles et temporelles de l'action.

> *"C'est une ville dans laquelle il y a beaucoup de jeunes. Donc le réglage de l'éclairage ce n'est plus avant minuit et après minuit, c'est avant 3h du matin et après 4 h du matin. Donc on a laissé allumé. Le canal du Midi c'est l'inverse. On a deux "Canal du Midi", l'un qui est complètement pollué par l'éclairage au sodium noyé dans l'hypercentre urbain, là la faune elle est polluée par les bagnoles, les magasins, les livraisons. Et on a une autre partie plus au Sud, on l'a éclairée en 2015 et là il n'y avait pas de lumière. Ça fait 10 ans qu'on me dit qu'il faut éclaire la partie Sud. C'est plus une piste cyclable, c'est devenu une autoroute, vélo, joggeurs, femmes, etc. Ça permet de désengorger la ville, les gens l'empruntent pour aller travailler. Donc il faut faire quelque chose pas cher. Mais c'est le canal du midi avec des platanes, il y a l'eau, c'est la nature. Alors comment est-ce qu'on va éclairer des gens sans polluer la nature ? On éclaire de tache en tache : les personnes vont de tache de lumière en tache de lumière, pour être rassuré. Je suis sûr qu'à chaque zone d'ombre on peut voir le joggeur accélérer. On a mis 19 Watts, on aurait pu peut-être aller sur du 15 Watts… mais aller en-dessous de ça, politiquement, c'est un peu chercher la bagarre. On fait un truc* a minima *pour la consommation, donc pour moi c'est écologique. Effectivement, avant il n'y avait pas de lumière donc il y a des petites bêtes qui se sont vu gênées… Maintenant, est-ce que les chauves-souris se sont adaptées et passent dans le noir alors que les êtres humains passent dans la lumière, ça je ne sais pas…"*
>
> Responsable du service Éclairage public de la ville de Toulouse.

Ainsi énoncé, le processus de territorialisation est proche à la fois de la gouvernance adaptative — dont la pertinence pour résoudre les décalages d'échelles au sein des systèmes socio-écologiques a été largement démontrée — et de la gouvernance multi-niveau. Cependant, la territorialisation est plus critique en ce qui concerne les fondements et la signification des systèmes de gouvernance préexistants. En d'autres termes, la territorialisation laisse ouverte la possibilité de remettre en cause les cadres institutionnels de gouvernance, car elle considère la signification des lieux et les relations aux espaces vécus comme des faits qui doivent être pris en compte dans la définition des instruments de préservation de la biodiversité. Sans trop nourrir d'illusions sur la symétrisation des relations de pouvoir dans le processus d'élaboration des politiques environnementales à travers la participation des citoyens, et sans négliger le rôle clé de nombreux acteurs intermédiaires dans la mise en œuvre de la conservation de la biodiversité, il semble pourtant que le débat et la proximité de la prise de décision et de l'implication des citoyens sont alors consubstantiels à la territorialisation de la gestion de l'obscurité en tant que ressource socio-écologique.

D'un point de vue pratique, le processus de territorialisation est nécessairement une démarche située et orientée vers l'action. Elle est située parce qu'elle prend en considération les différentes dimensions qui structurent le territoire et la spécificité des lieux — par exemple les dimensions culturelles, historiques, politiques, physiques ou écologiques. Elle est orientée vers l'action parce qu'elle vise à réunir les chercheurs, les résidents, les politiciens, les praticiens, les groupes d'utilisateurs, les associations environnementales et les experts. La territorialisation telle que nous l'entendons est donc une méthode pratique visant à faire entrer les méthodes et connaissances scientifiques en société. Elle consiste à former des publics capables de définir des problèmes et de préconiser des voies de résolutions.

À cette fin, la territorialisation de la conservation de la ressource obscurité et de la biodiversité nocturne devrait être construite au sein de forums hybrides permettant l'expression de la pluralité des systèmes de connaissance et des territorialités nocturnes. Ces forums hybrides, bien que prévus dans le déroulement du programme ITTECOP Chirolum, n'ont pu avoir lieu en raison de calendrier (temporalité de la production des résultats de l'expérimentation écologique le long des canaux du Midi et de Brienne, mais également contexte électoral et sanitaire). Néanmoins, notre participation à d'autres projets de recherche-action (entre autres : Programme Trame Noire de la

Métropole européenne de Lille, Groupe de travail Environnement nocturne du PNR des Baronnies provençales, Ateliers Lumière & Transition du Parc national de La Réunion, programme Trames Noires du Massif central piloté par l'Inter-Parcs du Massif central — IPAMAC) nous permet de valider cette démarche dans des contextes territoriaux différents. Ces territoires montrent tous la même difficulté de dépasser la seule prise en compte des enjeux économiques pour cheminer vers une réelle considération des enjeux de préservation de la biodiversité nocturne. Les arguments, souvent les mêmes, soulignent la nécessaire acculturation et sensibilisation des élus et des services techniques aux enjeux de préservation de la biodiversité alors que la nouvelle réglementation, bien qu'ayant gagné en précision, reste lacunaire dans son application :

> *"À Toulouse on a été précurseur pour prendre en compte la biodiversité et les usages publics. Mais d'abord on respecte la commande politique. On est des techniciens de l'éclairage, on en se préoccupe pas a priori des petites bêtes s'il n'y a pas de commande politique. Si l'objectif politique est de respecter les formes de vie, on modifie l'éclairage. Et on intègre la dimension économique, éclairer cela coûte cher. Avant on éclairait moins, pour protéger les petites bêtes, mais on a oublié les gens. Il fallait regarder ses pieds pour se déplacer. Les gens se sont retrouvés avec un plafond noir juste au-dessus de la tête et ça a créé un sentiment... je ne dirais pas d'insécurité, mais de mal être. La population n'a pas les mots : 'rallumer', 'c'est mal éclairé', ça ne veut rien dire. D'où changement politique : 'je vais tout changer', 'je vais rallumer', etc. Ça veut dire redonner un sentiment de sécurité par des ambiances plus chaleureuses, plus agréables, ça ne veut pas dire en foutre partout. Et c'est là toute la difficulté. Il a fallu redonner un peu de volume sans éclairer le ciel. Éclairer le ciel… je m'en fous des étoiles et des petites bêtes, mais c'est des Watt que je produis. Si j'éclaire l'environnement je consomme pour rien, c'est mon argument pour les écolos : c'est économique."*
>
> Responsable du service Éclairage public de la ville de Toulouse.

> *"Sur le canal on est toujours dans le compromis entre des exigences difficilement conciliables voire irréconciliables : par exemple les aspects très esthétiques, patrimoniaux, paysagers, qui peuvent avoir presque une vision — quoi qu'ils en disent — muséifiée et presque théorique des choses, les exigences très techniques liées à l'exploitation, en fait la vie de ce canal, ce qui lui permet de survivre… déjà c'est une danseuse la canal du midi, faut pas en rajouter non plus… et puis des exigences qui sont peut-être les dernières arrivées sur le terrain mais qui prennent de plus en plus de place et à juste titre, sur l'environnement, la biodiversité, et encore je cite que celles-là ! Mais quand on commence à tout mettre bout à bout, il y a celui qui est spécialisé sur les chiroptères, celui spécialisé sur… etc. etc. Il y a une saturation des enjeux de protection, des difficultés à mettre en œuvre, à opérationnaliser, sinon c'est l'exploitation même du canal qui est en cause, et donc sa raison d'être première."*
>
> Chargée de mission Environnement de VNF.

En l'absence de scènes ou enceintes dédiées, la publicisation des enjeux passe par l'interpellation directe des maires et services de la DREAL. Diverses coalitions d'acteurs — au sein desquelles les acteurs historiques du *dark-sky movement* (astronomes amateurs, ANPCEN) et les associations environnementales reconnues d'utilité publique (FNE, FRAPNA) — jouent un rôle prépondérant pour pousser les autorités compétentes à intégrer les dimensions écologique et sanitaire de la lumière artificielle dans les pratiques d'éclairage.

On relève que dans la lignée de la démarche offensive menée avec l'ANPCEN et la FRAPNA Isère en 2017, l'antenne régionale FNE Midi-Pyrénées, particulièrement active sur la question de la pollution lumineuse, poursuit son travail d'interpellation des pouvoirs publics pour une application effective des dispositions du Code de l'Environnement en matière de pollution lumineuse — et plus spécifiquement de l'Arrêté du 25 janvier 2013 relatif à l'éclairage nocturne des bâtiments non résidentiels afin de limiter les nuisances lumineuses et les consommations d'énergie. L'association travaille sur deux fronts. Elle envisage, d'une part, un recours devant le juge administratif :

> "*On va peut-être attaquer Toulouse métropole pour non application des arrêtés et pour ne pas mandater la police municipale pour faire appliquer la loi."*
>
> Chargée de mission FNE Midi-Pyrénées.

Elle mise, d'autre part, sur des démarches participatives permettant à chaque citoyen d'user de son droit d'interpellation. En d'autres termes, FNE Midi-Pyrénées travaille à la création d'un pouvoir d'interpellation citoyen des décideurs politiques. C'est à ce titre que l'association initie en 2018 son programme "Ambassadeurs de la nuit", dont l'objectif est d'enrôler les citoyens-habitants dans "la chasse aux pollutions lumineuses", et ce, en organisant des maraudes pour arpenter les rues de leurs communes afin d'appliquer l'arrêté Batho interdisant aux enseignes commerçantes et bureaux d'être éclairés entre 1h et 5h du matin au minimum (Figure 11). Ces actions se poursuivent en 2019 et 2020, organisées en différentes phases — état des lieux, sensibilisation des commerçants, vérification des changements de pratique. En mai 2020, une méthode permettant une participation plus large est publiée, qui permet à FNE de recueillir des données sur l'application effective de la loi autrement que via des actions ponctuelles et nécessairement limitées dans l'espace comme dans le temps.

Figure 11. Illustration de l'action lancée par FNE permettant de relever les enseignes ne respectant pas l'arrêté Batho.

Valorisation et perspectives

La collaboration radicalement interdisciplinaire menée à l'occasion du programme ITTECOP Chirolum a permis d'opérer la jonction avec les travaux menés entre 2015 et 2017 dans la Métropole Européenne de Lille à l'occasion du programme Trame Noire, labellisé ITTECOP). Ce rapprochement a débouché sur la rédaction d'un article collectif[8] définissant et travaillant plus avant le concept de "réseau écologique sombre" et les enjeux de sa traduction en instrument d'action publique. Cet article a été soumis à la revue *Ecology and Society* en juin 2020 et a été accepté pour publication au premier trimestre 2021. Une version française de cet article est en cours de préparation, qui sera soumise à la revue *Natures Sciences Sociétés*.

[8] Challéat, S. & K. Barré, A. Laforge, D. Lapostolle, M. Franchomme, C. Sirami, I. Le Viol, J. Milian, and C. Kerbiriou (à paraître). Grasping darkness: the dark ecological network as a social-ecological framework to limit the impacts of light pollution on biodiversity. *Ecology and Society*.

SYNTHESE DES RESULTATS

• Dans ses grands principes, la préservation de l'environnement nocturne est désormais une préoccupation de l'aménagement de l'espace et de l'urbanisme. Mais elle oblige à de nouveaux arbitrages, à la définition de nouveaux référentiels d'action publique conciliant les enjeux sociotechniques et environnementaux de l'éclairage artificiel nocturne.• Les chauves-souris se tiennent à plusieurs mètres des ponts éclairés, à savoir au moins 8 mètres, alors qu'elles volent à proximité immédiate de ponts non éclairés.

• Plus particulièrement du point de vue écologique, les effets de la lumière artificielle sur les habitats restent peu ou mal connue des acteurs de l'aménagement de l'espace, notamment en ce qui concerne ses effets de fragmentation.

• De nombreuses solutions techniques – utiles aux échelles locales pour la « mitigation » – sont bien identifiées et connues des services urbains en charge de l'éclairage, mais leur mise en œuvre peine à s'affranchir des contraintes financières et politiques qui prévalent dans la fabrique du projet d'éclairage urbain.

• Malgré un dispositif réglementaire désormais bien consolidé en France, force est de constater, que les services techniques des collectivités se trouvent en difficulté quand il s'agit d'intégrer le respect de la biodiversité dans un cadrage techno-économique bien rôdé.

• En matière de préservation de l'environnement nocturne, la gouvernance d'un système socio-écologique complexe comme le canal du Midi à Toulouse se heurte à la division verticale et horizontale techno-politique de l'éclairage public – division qui se traduit dans les logiques en silo de services sectorisés.

• Liée aux problématiques du changement environnemental global et de la préservation de l'environnement, concevoir l'obscurité comme un commun partagé entre humains et non humains met en exergue la question de la gestion collective des ressources et fait entrer de nouveaux acteurs dans l'arène.

IMPLICATIONS OPERATIONNELLES

• Pour que sa territorialisation s'opère convenablement, les outils de la préservation de l'environnement nocturne doivent se faire les véhicules de la socialisation de la lutte contre la pollution lumineuse, et non les véhicules de sa 'confiscation cognitive' par la technicisation du problème.

• Parce qu'elle entrainera nécessairement des modifications profondes du cadre de vie, la territorialisation de la préservation de l'obscurité en milieu urbain est un projet de société qui doit être débattu dans des arènes ouvertes à des publics pluriels.

• Les modalités de la gouvernance du système territorial doivent être questionnées, pour les emmener vers des formes plus collaboratives mettant l'accent sur la résilience des systèmes, l'autonomisation et l'accès à la connaissance des acteurs.

• À l'image d'autres problématiques environnementales, le développement de pratiques transdisciplinaires participatives nous semble le véhicule privilégié pour "faire entrer les sciences en démocratie", casser les séparations disciplinaires et les séparations entre science et action, et ainsi poser les conditions de la bifurcation des trajectoires d'aménagement et de développement des territoires sous contrainte écologique forte.

7. Conclusion et perspectives

Le projet Chirolum a permis d'approfondir les connaissances existantes sur les effets de la lumière artificielle sur la biodiversité, en explorant les effets méconnus sur la fonctionnalité des corridors écologiques. D'une manière générale, même si certains résultats montrent que les caractéristiques des éclairages peuvent atténuer certains impacts sur certaines espèces, le projet montre que faire évoluer la couleur d'éclairage vers des couleurs plus chaudes (par exemple rouge avec une quantité infime d'ultraviolets et de lumière bleue comme dans notre étude) ne semble pas aussi efficace en termes de réduction des perturbations fonctionnelles et comportementales que ce que laissaient présager des études récentes (Spoelstra et al., 2017 ; Zeale et al., 2018). La solution la plus efficace mise en évidence par le projet reste d'éteindre les éclairages autant que possible puisque la présence de lumière affecte tous les groupes de chauves-souris quelles que-soient ses caractéristiques même si la modulation de certaines d'entre elles peut contribuer à réduire les perturbations. Cependant les résultats montrent que ces impacts « locaux » semblent se limiter au rayon « d'action » de la lumière, c'est-à-dire dans un rayon de quelques dizaines de mètres au maximum, suggérant ainsi que la diminution de l'intensité et de la portée des éclairages pourrait être un levier de réduction des impacts. Les résultats montrent aussi que la directionnalité de l'éclairage joue un rôle prépondérant, avec des impacts qui semblent se produire principalement là où la lumière est dirigée, suggérant ainsi qu'une orientation non dirigée sur les corridors écologiques tels que le Canal du Midi pourrait potentiellement préserver leur fonctionnalité.

Le projet démontre aussi qu'en l'état actuel, l'éclairage artificiel le long des corridors (lisière ou canal) perturbe en profondeur le comportement des chauves-souris, et les incite à modifier leurs paramètres de vol. Il joue un effet barrière, qui diminue très probablement la connectivité fonctionnelle des paysages chez ces espèces. Ces modifications des comportements de vol en présence de lumière se traduisent potentiellement par des coûts énergétiques plus importants : qui affectent en retour probablement la dynamique des populations. Le projet révèle aussi un très fort silotage entre les différents acteurs institutionnels susceptibles d'intervenir plus ou moins directement dans des stratégies de diminution et de gestion de l'éclairage en faveur de la biodiversité. Cela amène ainsi à de nombreuses carences en termes d'application de la loi (arrêté Batho, 2013) et à la situation actuelle dans laquelle la fonctionnalité du seul vrai corridor végétalisé traversant l'agglomération de Toulouse est compromise, avec de nombreuses conséquences potentielles en termes d'isolement de population, de pertes d'habitat, de perte de mobilité, etc (Hopkins et al., 2018).

Les recherches menées apportent une nouvelle dimension à la compréhension des impacts de la lumière sur la fonctionnalité des corridors écologiques, en mettant en évidence des perturbations comportementales et d'utilisation de l'espace par les chauves-souris imperceptibles en utilisant les méthodes d'étude classiques. Ces recherches ouvrent désormais la voix à de nouveaux projets qui pourraient plus spécifiquement tester l'efficacité d'un maximum de scénarios de réduction des impacts, par exemple par réduction de l'intensité lumineuse, de l'étalement du halo, en restreignant la composition spectrale aux couleurs chaudes, en orientant l'éclairage vers les zones les moins favorables, en éteignant l'éclairage durant les premières et dernières heures de la nuit lorsque les chauves-souris sont les plus actives ou de façon automatisée par détection de présence humaine. Des études à l'échelle paysagère mériteraient aussi d'évaluer la localisation dans le paysage des impacts à petite échelle que nous avons étudié. Plus spécifiquement, la planification territoriale des politiques de diminution de l'éclairage doit être guidées par des études permettant de spatialiser les enjeux. Grâce à un imposant jeu de données de chauves-souris récolté sur la plaine de Valence dans la Drôme par la Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO) et mis en notre disposition, nous avons pu explorer la relation entre la réponse des espèces à la lumière artificielle et la composition en habitats environnants. L'étude montre globalement que les perturbations engendrées par la lumière sont d'autant plus importantes que le paysage immédiat est peu urbanisé et riche en milieux naturels. Ces recherches ont également fait l'objet d'un article (article 5) actuellement en révision majeure dans *Journal of Applied Ecology*. Ce type de conclusions permet d'améliorer la spatialisation et hiérarchisation des actions de lutte contre l'éclairage artificiel dans les territoires, en étant capables de ciblés les efforts vers les zones à plus forts enjeux.

8. Valorisations réalisées ou en cours

Articles scientifiques

1- Barré K., Spoelstra K., Bas Y., Challéat S., Ing K.I., Azam C., Kerbiriou C. & Le Viol I. 2020. Artificial light may change flight patterns of bats near bridges along urban waterways. *Animal Conservation (In press). https://doi.org/10.1111/acv.12635*

2- Challéat S.*, Barré K.*, Laforge A., Lapostolle D., Franchomme M., Sirami C., Le Viol I., Milian J. & Kerbiriou K. Grasping darkness: the dark ecological network as a social-ecological framework to limit the impacts of light pollution on biodiversity. *Accepted in Ecology and Society. * equal contribution*

3- Barré K., Kerbiriou C., Bas Y., Ing K.I., Azam C., Le Viol I & Spoelstra K. 2021. Bats seek refuge in cluttered environment when exposed to white and red lights at night. *Movement Ecology 9.* https://doi.org/10.1186/s40462-020-00238-2

4- Barré K., Kerbiriou C., Thomas I., Bas Y., Ing K.I., Le Viol I & Spoelstra K. White, green and red light at wooded edges generates barriers for commuting bats and deeply disrupt their activity. *In prep*

5- Barré K., Vernet A.; Azam C., Le Viol I., Dumont A., Deana T., Vincent S., Challéat S., Kerbiriou, C. Landscape composition drives the impacts of artificial light at night on insectivorous bats. *Major revision in Journal of Applied Ecology*

Rapport

Thomas Iuna. Effets de différents spectres lumineux sur l'activité et le déplacement des chiroptères le long d'une lisière forestière. Master 2 Modélisation en écologie. Agrocampus Ouest – Université Rennes 1, 2018, 41p.

Colloques

Barré K., Dupuis P., Challéat S., Kerbiriou C., Ing R. K., Lapostolle D., Le Viol I., Spoelstra K., Zissis G. (2019) Caractérisation de l'influence des paramètres lumineux des LEDs sur les mouvements de chiroptères le long des continuités écologiques. Colloque ITTECOP 2019 « Fonctionnalités écologiques et territoriales des infrastructures linéaires de transport et de leurs emprises» - Ademe Sophia-Antipolis, 5 juin 2019 – Valbonne

Barré K., Dupuis P., Challéat S., Kerbiriou C., Ing R. K., Lapostolle D., Le Viol I., Spoelstra K., Zissis G. (2019) Caractérisation de l'influence des paramètres lumineux des LEDs sur les mouvements de chiroptères le long des continuités écologiques. Journée jeunes chercheurs « infrastructures, écologie et paysage, sociétés et territoires » - AgroParisTech – ITTECOP, 24 janvier 2019 – Paris

Barré K., Deana T., Dumont A., Kerbiriou C., Le Viol I., Pauwels J., Spoelstra K., Vernet A., Vincent S. (2018) Landscape-dependent effects of artificial light on bat activity. CESCO. ALAN conference – Salt Lake City

Presse audio

25/09/2019 : France Culture, La méthode scientifique. La pollution lumineuse : un jour sans fin. Invité de Nicolas Martin. https://www.franceculture.fr/emissions/la-methode-scientifique/pollution-lumineuse-un-jour-sans-fin (Samuel Challéat et Kévin Barré)

9. Références bibliographiques

Arthur L, Lemaire M, Dufrêne L, Viol I Le, Julien JF, Kerbiriou C. 2014. Understanding Bat-Habitat Associations and the Effects of Monitoring on Long-Term Roost Success using a Volunteer Dataset. Acta Chiropterologica 16:397–411.

Azam C, Kerbiriou C, Vernet A, Julien J-F, Bas Y, Plichard L, Maratrat J, Le Viol I. 2015. Is part-night lighting an effective measure to limit the impacts of artificial lighting on bats? Global Change Biology 21.

Azam C, Le Viol I, Julien J-F, Bas Y, Kerbiriou C. 2016b. Disentangling the relative effect of light pollution, impervious surfaces and intensive agriculture on bat activity with a national-scale monitoring program. Landscape Ecology 31:2471–2483.

Benítez-López A, Alkemade R, Verweij PA. 2010. The impacts of roads and other infrastructure on mammal and bird populations: A meta-analysis.

Bennett VJ, Sparks DW, Zollner PA. 2013. Modeling the indirect effects of road networks on the foraging activities of bats. Landscape Ecology 28:979–991.

Bennett VJ, Zurcher AA. 2013. When corridors collide: Road-related disturbance in commuting bats. The Journal of Wildlife Management 77:93–101.

Bennie J, Davies TW, Cruse D, Inger R, Gaston KJ. 2015. Cascading effects of artificial light at night: resource-mediated control of herbivores in a grassland ecosystem. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 370.

Berg Å, Bergman K-O, Wissman J, Żmihorski M, Öckinger E. 2016. Power-line corridors as source habitat for butterflies in forest landscapes. Biological Conservation 201:320–326.

Berthinussen A, Altringham J. 2012. The effect of a major road on bat activity and diversity. Journal of Applied Ecology 49:82–89. Blackwell Publishing Ltd.

Claireau, F., Bas, Y., Pauwels, J., Barré, K., Machon, N., Allegrini, B., Puechmaille, S.J., Kerbiriou, C., 2019. Major roads have important negative effects on insectivorous bat activity. Biol. Conserv. 235, 53–62.

Da Silva A, Valcu M, Kempenaers B. 2015. Light pollution alters the phenology of dawn and dusk singing in common European songbirds. Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences 370.

Davies TW, Duffy JP, Bennie J, Gaston KJ. 2014. The nature, extent, and ecological implications of marine light pollution. Frontiers in Ecology and the Environment 12:347–355.

Day J, Baker J, Schofield H, Mathews F, Gaston KJ. 2015. Part-night lighting: implications for bat conservation. Animal Conservation

De Conno, C., Nardone, V., Ancillotto, L., De Bonis, S., Guida, M., Jorge, I., Scarpa, U., Russo, D., 2018. Testing the performance of bats as indicators of riverine ecosystem quality. Ecol. Indic. 95, 741–750.

Falchi F, Cinzano P, Duriscoe D, Kyba CCM, Elvidge CD, Baugh K, Portnov BA, Rybnikova NA, Furgoni R. 2016. The new world atlas of artificial night sky brightness. Science Advances:1–26.

Fensome AG, Mathews F. 2016. Roads and bats: a meta-analysis and review of the evidence on vehicle collisions and barrier effects. Mammal Review 46:311–323.

Ffrench-Constant RH et al. 2016. Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom. Proceedings. Biological sciences / The Royal Society 283:912–927.

Foley JA et al. 2005. Global consequences of land use. Science 309:570–4.

Gaston KJ, Duffy JP, Bennie J. 2015. Quantifying the erosion of natural darkness in the global protected area system. Conservation Biology 29:1132–1141.

Hölker F et al. 2010. The Dark Side of Light: A Transdisciplinary Research Agenda for Light Pollution Policy 15.

Hopkins, G.R., Gaston, K.J., Visser, M.E., Elgar, M.A., Jones, T.M., 2018. Artificial light at night as a driver of evolution across urban–rural landscapes. Front. Ecol. Environ. 16, 472–479.

Jeusset A et al. 2016. Can linear transportation infrastructure verges constitute a habitat and/or a corridor for biodiversity in temperate landscapes? A systematic review protocol. Environmental Evidence 5:1–11.

Kalarus K, Bąkowski M. 2015. Railway tracks can have great value for butterflies as a new alternative habitat. Italian Journal of Zoology 82:565–572.

Kociolek A V, Clevenger AP, Clair CC St., Proppe DS. 2011. Effects of Road Networks on Bird Populations. Conservation Biology 25:241–249.

Knop E., Zoller L., Ryser R., Gerpe C., Fontaine C. 2017. Artificial light at night as a new threat to pollination, Nature 548, 206–209.

Kyba C, Hänel a, Hölker F. 2014. Redefining efficiency for outdoor lighting. Energy & Environmental Science 7:1806.

Le Viol I, Chiron F, Julliard R, Kerbiriou C. 2012. More amphibians than expected in highway stormwater ponds. Ecological Engineering 47:146–154.

Le Viol I, Julliard R, Kerbiriou C, de Redon L, Carnino N, Machon N, Porcher E. 2008. Plant and spider communities benefit differently from the presence of planted hedgerows in highway verges. Biological Conservation 141:1581–1590.

Le Viol I, Mocq J, Julliard R, Kerbiriou C. 2009. The contribution of motorway stormwater retention ponds to the biodiversity of aquatic macroinvertebrates. Biological Conservation 142:3163–3171.

Lintott PR, Bunnefeld N, Park KJ. 2015. Opportunities for improving the foraging potential of urban waterways for bats. Biological Conservation 191:224–233.

Lugon A, Eicher C, Bontadina F. 2017. Conservation des chauves-souris dans le cadre de la planification, de l'aménagement et de l'assainissement des infrastructures de transport – Base de travail. sur mandat de l'OFEV et de l'OFROU. 78 p.

Macgregor CJ, Evans DM, Fox R, Pocock MJO. 2016. The dark side of street lighting: impacts on moths and evidence for the disruption of nocturnal pollen transport. Global Change Biology.

Newbold T et al. 2016. Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary? A global assessment. Science 353:288–91.

Owens, A.C.S., Lewis, S.M., 2018. The impact of artificial light at night on nocturnal insects: A review and synthesis. Ecol. Evol.

Owens, A., Cochard, P., Durrant, J., Perkin, E., Seymoure, B., 2019. Light Pollution Is a Driver of Insect Declines. Biol. Conserv.

Perkin EK, Hölker F, Richardson JS, Sadler JP, Wolter C, Tockner K. 2011. The influence of artificial light on stream and riparian ecosystems: questions, challenges, and perspectives. Ecosphere 2:art122.

Penone, C., Machon, N., Julliard, R., Le Viol, I., 2012. Do railway edges provide functional connectivity for plant communities in an urban context? Biol. Cons. 148, 126e133.

Raap T et al. 2015. Light pollution disrupts sleep in free-living animals. Scientific Reports 5:1–8.

Saarinen K, Valtonen A, Jantunen J, Saarnio S. 2005. Butterflies and diurnal moths along road verges: Does road type affect diversity and abundance? Biological Conservation 123:403–412.

Russo, D., Cosentino, F., Festa, F., De Benedetta, F., Pejic, B., Cerretti, P., Ancillotto, L., 2019. Artificial illumination near rivers may alter bat-insect trophic interactions. Environ. Pollut. 252, 1671–1677.

Sanders, D., Frago, E., Kehoe, R., Patterson, C., Gaston, K.J., 2020. A meta-analysis of biological impacts of artificial light at night. Nat. Ecol. Evol.

Sordello R., Vanpeene S., Azam C., Kerbiriou C., Le Viol I.,, Le Tallec T. 2014. Effet fragmentant de la lumière artificielle. Quels impacts sur la mobilité des espèces et comment peuvent-ils être pris en compte dans les réseaux écologiques ? MNHN, Centre de ressources Trame verte et bleue. 31p.

Spoelstra, K., van Grunsven, R.H.A., Ramakers, J.J.C., Ferguson, K.B., Raap, T., Donners, M., Veenendaal, E.M., Visser, M.E., 2017. Response of bats to light with different spectra: light-shy and agile bat presence is

affected by white and green, but not red light. Proceedings of the Royal Society of London Biological Science 284, 20170075.

Stone EL, Harris S, Jones G. 2014. Impacts of artificial lighting on bats: A review of challenges and solutions. Mammalian Biology.

Stone EL, Jones G, Harris S. 2012. Conserving energy at a cost to biodiversity? Impacts of LED lighting on bats. Global Change Biology 18:2458–2465.

Thapan K, Arendt J, Skene DJ. 2001. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. The Journal of Physiology 535:261–267.

Trombulak SC et al. 2000. Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities. Conservation Biology 14:18–30.

van Grunsven, R.H.A., van Deijk, J.R., Donners, M., Berendse, F., Visser, M.E., Veenendaal, E., Spoelstra, K., 2020. Experimental light at night has a negative long-term impact on macro-moth populations. Current Biology 30, R694–R695.

van Langevelde F, Ettema JA, Donners M, WallisDeVries MF, Groenendijk D. 2011. Effect of spectral composition of artificial light on the attraction of moths. Biological Conservation 144:2274–2281.

Vandevelde J-C, Bouhours A, Julien J-F, Couvet D, Kerbiriou C. 2014. Activity of European common bats along railway verges. Ecological Engineering 64:49–56.

Zeale, M.R.K., Stone, E.L., Zeale, E., Browne, W.J., Harris, S., Jones, G., 2018. Experimentally manipulating light spectra reveals the importance of dark corridors for commuting bats. Glob. Chang. Biol. 24, 5909–5918.

10. Index des tableaux et figures

Figures

Figure 1. Illustrations d'exemples de sites expérimentaux aux Pays-Bas, à gauche un lampadaire vert et à droite un lampadaire rouge avec le matériel de suivi déployé. 9

Figure 2. Représentation schématique de l'expérience à base de trajectographie aux Pays-Bas..... 10

Figure 3. Probabilité qu'une chauve-souris soit en sous-bois plutôt qu'en milieu ouvert en fonction de la distance à la lampe et du type de spectre. 11

Figure 4. Représentation des mesures d'intensité lumineuses effectuées sur les sites pour les lampes blanches et rouges, en fonction de la localisation par rapport au lampadaire (en face, derrière ou de côté). Les deux cercles schématisent l'orientation et la portée des lampes au sol. 12

Figure 5. Représentation des niveaux d'activité (nombre de passages de chauves-souris enregistrés indépendamment des traversées) sur les sites en fonction de la couleur d'éclairage : témoin (gris), vert, rouge et blanc. 13

Figure 6. Représentation des taux de franchissement du halo lumineux par les Pipistrelles (A) et Sérotines/Noctules (B) en fonction du côté par lequel arrive l'individu et du type de lampe, et ceci pour trois grandes catégories de vitesse de vol attendue. 15

Figure 7. Carte de la localisation des ponts étudiés (deux passerelles piétonnes et quatre ponts routiers) et photographies des sites (en jaune les ponts éclairés, en gris les ponts non éclairés). La photographie du bas illustre le matériel utilisé, antenne de trajectographie, pour l'étude d'un des sites. 18

Figure 8. Histogramme de distribution des positions de chauves-souris en 3D en fonction de leur distance au pont (matérialisé par la ligne verticale rouge), en gris pour les ponts non éclairés et en bleu pour les pont éclairés (a). Le panel de droite (b) quant à lui montre les écarts cumulés en termes de distance au pont entre les positions en 3D sur les ponts éclairés et la distribution attendue en condition non éclairée. 19

Figure 9. Evolution des vitesses de vol en fonction de la distance au pont (matérialisé par les lignes verticales discontinues) pour les ponts non éclairés (gris) et les ponts éclairés (bleu), avec un zoom au centre sur la partie grise représentant l'intervalle de distances au pont dans lequel les données entre ponts éclairés et non éclairés sont pleinement comparables. 20

Figure 10. Illustration de la passerelle éclairée échantillonnée (a) ainsi que d'un des ponts éclairés échantillonné (b). 20

Figure 11. Illustration de l'action lancée par FNE permettant de relever les enseignes ne respectant pas l'arrêté Batho. 24

Tableaux

Tableau 1. Synthèse des services et fonctions des personnes rencontrées dans le cadre de l'axe 3. 23

11. Sigles et acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFB	Agence française de la biodiversité
COHNECS-IT	COnnectivité longitudinale et potentiel d'Habitat des dépendances vertes en fonction de leur Nature, des Espèces et du Contexte : une revue Systématique sur les Infrastructures de Transport
FNE	France Nature Environnement
FRB	Fondation pour la recherche sur la biodiversité
ILTe	Infrastructure linéaire de transport
IPAMAC	Association des Parcs naturels du Massif central
ITTECOP	Infrastructure de transport terrestre écosystème et paysage
LED	Light-emitting diode
PNR	Parc naturel régional
UV	Ultraviolet

L’ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L’Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l’économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l’Environnement, de l’Énergie et de la Mer et du ministère de l’Éducation nationale, de l’Enseignement supérieur et de la Recherche.

LES COLLECTIONS
DE L’ADEME

ILS L’ONT FAIT
L’ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.

EXPERTISES
L’ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.

FAITS ET CHIFFRES
L’ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d’indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.

CLÉS POUR AGIR
L’ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.

HORIZONS
L’ADEME tournée vers l’avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

PROJET CHIROLUM. Comment limiter les impacts écologiques de l'éclairage artificiel nocturne le long des ILTe ? *Caractérisation de l'influence des paramètres lumineux des lampes sur les mouvements des chiroptères.*

Résumé

Ce présent rapport expose les résultats du projet Chirolum ayant pour objectif d'identifier des pistes de réduction des impacts écologiques de l'éclairage artificiel le long des infrastructures de transport. En prenant l'exemple de sites d'études le long de lisières forestières aux Pays-Bas et le long du Canal du Midi à Toulouse, les résultats montrent que la lumière perturbe fortement l'usage de ces continuités écologiques et infrastructures de transport par les chauves-souris, engendrant des modifications dans le comportement de vol et potentiellement des coûts énergétiques supplémentaires, ainsi qu'une diminution de la connectivité fonctionnelle. Le projet met en évidence que le meilleur levier d'action reste d'éteindre autant que possible les sources de lumière, en montrant notamment que des impacts forts persistent même en changeant la couleur d'éclairage vers du rouge contenant peu de lumière bleue et d'ultraviolets et en diminuant l'intensité. Cependant le projet révèle aussi que les perturbations ne semblent pas s'étaler à plus de quelques dizaines de mètres des sources lumineuses, et que la direction de l'éclairage constitue un paramètre clé sur lequel il est possible d'agir afin de réduire les impacts, en évitant notamment de diriger les éclairages vers les corridors écologiques. Enfin le projet révèle aussi que les perturbations comportementales et fonctionnelles observées au sein de la ville de Toulouse sont le fruit d'un manque de gestion du parc d'éclairage vers des schémas d'extinction ou de réduction, exacerbé par un manque de communication entre services institutionnels susceptibles d'intervenir dans les politiques de prise en compte des enjeux biodiversité en lien avec l'éclairage artificiel.

ADEME

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

www.ademe.fr