

ACCOMPAGNEMENT DES COLLECTIVITES DE CINQ PARCS NATIONAUX DANS LA REDUCTION DE LA POLLUTION LUMINEUSE ET DE SES IMPACTS, NOTAMMENT SUR LA BIODIVERSITE



Parc national
de La Réunion



Parc national
des Pyrénées



Parc national
des Cévennes



Parc national
du Mercantour



Parc national
de Port-Cros



OFB
OFFICE FRANÇAIS
DE LA BIODIVERSITÉ

ANNEXE 6 : Synthèse de la bibliographie scientifique sur les impacts de la pollution lumineuse sur la biodiversité et implications sur la gestion de l'éclairage



| | | | |
|--------------------------------------|--|--|---|
| <p>Dossier 20064032 Jun 2021</p> |  |  |  |
| <p>réalisé par</p> | <p>ZAC du Chevalement 5 rue des Molettes 59286 Roost-Warendin 03 27 97 36 39 SASU au capital de 20 000 € SIREN 879 264 869</p> | <p>14, rue Ferlus 81 540 SOREZE 05 81 60 06 96 SAS au capital de 23 530,00 € SIREN 753 785 252</p> | <p>3 rue Romiguières 31 000 Toulouse 06 42 44 81 60 info@darkskylab.com</p> |

ACCOMPAGNEMENT DES COLLECTIVITES DE CINQ PARCS NATIONAUX DANS LA
REDUCTION DE LA POLLUTION LUMINEUSE ET DE SES IMPACTS, NOTAMMENT SUR LA
BIODIVERSITE

ANNEXE 6 : Synthèse de la bibliographie scientifique sur
les impacts de la pollution lumineuse sur la biodiversité
et implications sur la gestion de l'éclairage

| Version | Date | Description |
|---------|-----------|---|
| V1 | Juin 2021 | Synthèse de la bibliographie scientifique sur les impacts de la pollution lumineuse sur la biodiversité et implications sur la gestion de l'éclairage |

| | Nom - Fonction | Date | Signature |
|-----------|-----------------------------------|-----------|---|
| Rédaction | Yoann ROULET – Ingénieur écologue | Juin 2021 |  |



TABLE DES MATIERES

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION | 4 |
| I. GRANDS MAMMIFERES | 5 |
| I.1 Réponses comportementales | 5 |
| I.2 Réponses métaboliques | 5 |
| I.3 Synthèse | 6 |
| I.4 Implications en termes de gestion | 6 |
| II. PETITS MAMMIFERES HORS CHIROPTERES | 6 |
| II.1 Réponses comportementales | 6 |
| II.2 Réponses métaboliques | 7 |
| II.3 Synthèse | 7 |
| II.4 Implications en termes de gestion | 7 |
| III. CHIROPTERES | 7 |
| III.1 Réponses comportementales | 7 |
| III.1.a Gîte | 7 |
| III.1.b Chasse | 8 |
| III.1.c Transit | 10 |
| III.2 Réponses métaboliques | 11 |
| III.3 Synthèse | 11 |
| III.4 Implications en termes de gestion | 11 |
| IV. AMPHIBIENS | 12 |
| IV.1 Réponses comportementales | 12 |
| IV.2 Réponses métaboliques | 12 |
| IV.3 Synthèse | 13 |
| IV.4 Implications en termes de gestion | 13 |
| V. POISSONS | 13 |
| V.1 Réponses comportementales | 13 |
| V.2 Réponses métaboliques | 15 |
| V.3 Synthèse | 15 |
| V.4 Implications en termes de gestion | 15 |
| VI. OISEAUX | 16 |
| VI.1 Réponses comportementales | 16 |
| VI.1.a Migration | 16 |
| VI.1.b Reproduction et domaine vital | 16 |
| VI.1.c Sommeil | 17 |
| VI.1.d Mortalité des jeunes oiseaux marins type « Pétrels » | 17 |
| VI.2 Réponses métaboliques | 18 |
| VI.3 Synthèse | 20 |
| VI.4 Implications en termes de gestion | 20 |
| VII. FLORE | 20 |
| VII.1 Réponses écophysiologiques | 20 |
| VII.2 Synthèse | 21 |
| VII.3 Implications en termes de gestion | 21 |
| VIII. PAPILLONS DE NUIT | 23 |
| VIII.1 Attraction à la lumière | 23 |
| VIII.2 Reproduction | 25 |
| VIII.3 Croissance et diapause | 26 |
| VIII.4 Synthèse | 26 |
| VIII.5 Implications en termes de gestion | 27 |
| IX. INSECTES AQUATIQUES | 27 |
| IX.1 Attraction à la lumière | 27 |
| IX.2 Synthèse | 28 |
| IX.3 Implications en termes de gestion | 28 |
| REFERENCES | 29 |

Introduction

Le terme de « pollution lumineuse » apparait pour la première fois dans les années 1980 pour définir la gêne occasionnée par la lumière lors de l'observation de la voûte céleste.

Plusieurs définitions ont été proposées par différents auteurs. Nous retiendrons celle de Verheijen (1985) qui définit la pollution lumineuse ou « photopollution » comme « l'ensemble des lumières artificielles ayant des effets néfastes sur la faune et la flore ». Cette pollution lumineuse regroupe :

- La sur-illumination (utilisation excessive de la lumière)
- L'éblouissement (dû à une trop forte intensité lumineuse ou à un contraste trop fort entre couleurs claires et sombres)
- Le phénomène d'halo lumineux (formé par l'ensemble des faisceaux lumineux dirigés vers le ciel).

Compte tenu de la quasi-constance de la durée du jour depuis les cent derniers millions d'années, l'éclairage artificiel représente, à l'échelle des temps géologiques, une pression nouvelle sur l'environnement. Ce phénomène affecte donc directement les organismes vivants, et leurs réactions peuvent être diverses. Ainsi, on observe deux réactions fréquentes, la « phototaxie positive » lorsque des individus sont attirés par la lumière, et la « phototaxie négative » lorsqu'ils la fuient.

L'exposition à la lumière artificielle pendant la nuit peut aussi modifier la perception du cycle jour/nuit et entraîner des comportements anormaux chez certains groupes. Le comportement migratoire, la compétition inter et intraspécifique et les relations proies/prédateurs font partie des comportements qui peuvent être modifiés.

La prise en compte de ces effets néfastes est donc aujourd'hui une préoccupation importante, et implanter un éclairage raisonné peut permettre de les limiter. La France a ainsi réaffirmé sa volonté de prendre en compte ce phénomène en l'exprimant dans la loi n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages : « Les paysages nocturnes font partie du patrimoine commun de la nation (L.110-1 du code de l'environnement). Il est du devoir de chacun de veiller à la sauvegarde et de contribuer à la protection de l'environnement, y compris nocturne. (L.110-2 du code de l'environnement) ».

Le présent document permettra de mettre en relief la sensibilité de plusieurs groupes d'espèces à l'éclairage artificiel nocturne existant et aux modifications de l'éclairage prévues dans les plans d'actions. Il a pour but d'apporter un support scientifique à l'aide à la décision pour la gestion de l'éclairage.

Un focus sera réalisé sur 1) les Réponses comportementales à partir de multiples publications scientifiques et 2) les réponses métaboliques à partir de la publication de Grubisic et col. (2019), au regard de la production de la mélatonine.

Il sera fait un focus sur cette hormone car celle-ci a, au cours de l'évolution, adoptée de multiples fonctions biologiques : protection antioxydante, augmentation de la tolérance environnementale chez les champignons et les plantes, modulation des réactions immunitaires, expression chimique de la perception de l'obscurité chez les vertébrés, et régulation de la reproduction saisonnière chez les mammifères photopériodiques. Il s'agit donc d'une hormone commune à une grande partie du monde vivant. L'une de

ses fonctions et de référencer la chronologie annuelle et journalière des vertébrés dont dépend leur physiologie et leur comportement.

Une synthèse de ces impacts et les implications en termes de gestion sera réalisée par groupe faunistique.

Il est précisé que cette synthèse n'est pas exhaustive et que les publications scientifiques concernant les effets de la lumière artificielle sur la faune et la flore se multiplient de façon exponentielle. Ce document devra être lu comme une base de réflexion qui pourra être amendé des nouvelles découvertes scientifiques.

I. Grands Mammifères

I.1 Réponses comportementales

La pollution lumineuse a un effet sur le comportement des grands mammifères. Il a ainsi été démontré en Pologne par Michał Ciach & Arkadiusz Fröhlich (2019) que la répartition du Chevreuil (*Capreolus capreolus*) en milieu urbain est influencée par 1) l'ouverture du milieu et 2) l'intensité du halo lumineux (en $nW/cm^2 \times SR$). Le Chevreuil étant plus abondant en milieu ouvert et moins abondant en milieu éclairé. Au sud-ouest des Etats-Unis, Ditmer et col. (2020) ont eu les mêmes résultats concernant le Puma d'Amérique du Nord (*Puma concolor*) et le Cerf mulet (*Odocoileus hemionus*) excepté à la frontière entre les milieux urbains et les milieux naturels où le Cerf mulet avait tendance à paître en milieu éclairé. Dans cette même étude, les auteurs ont également constaté que le Puma d'Amérique du Nord avait réalisé plus de capture de Cerf mulet en milieux sombres. Cette dernière observation a permis de révéler l'influence de la pollution lumineuse sur la relation proie-prédateur chez les grands mammifères. Enfin, une étude réalisée par Bliss-Ketchum et col. (2016) a permis de révéler que les passages à faune sous-terrain sont moins efficaces pour le Cerf mulet (*Odocoileus hemionus*) lorsqu'ils sont éclairés par des LEDs de 2700 K ou 3000 K avec un éclairage respectif de 172 lx et 54 lx.

Il a donc été constaté une répulsion à la lumière de 2 espèces d'ongulés et 1 espèce de grand félin à la lumière en milieu naturel.

I.2 Réponses métaboliques

La synthèse de Grubisic et col. (2019) mentionne 4 articles portant sur la Vache de race Holstein Israélienne, la Chèvre (race non renseignée), le Mouton (race non renseignée) et le Cheval. Ces 4 ongulés ont présenté une diminution de mélatonine. La réponse minimale est de -43,1 % pour la chèvre lorsque le traitement était de $2,3 \text{ lx} \pm 0,3 \text{ lx}$ ($0,68 \pm 0,09 \mu W/cm^2$) avec une lampe fluorescente de couleur « blanc froid ».

En résumé, les ongulés présentent une forte diminution de la mélatonine avec l'éclairage ; un éclairage de seulement $2,3 \text{ lx}$ pouvant induire une diminution de plus de 40 % chez la chèvre. Les effets de la pollution lumineuse sur la sécrétion de mélatonine concernent donc des espèces sauvages comme des espèces domestiques.

I.3 Synthèse

Les Grands Mammifères, notamment les ongulés et les prédateurs, sont plutôt lucifuges en milieu naturel.

Le niveau de mélatonine décroît fortement avec l'éclairement. Des effets ont été mesurés à des niveaux d'éclairement de 2,3 lx.

I.4 Implications en termes de gestion

Les articles étudiés n'ont pas permis d'identifier un seuil d'éclairement pour observer l'effet de répulsion chez ces espèces. Il sera retenu qu'il est nécessaire d'éclairer le moins possible pour réduire l'effet de répulsion des Grands Mammifères.

Aucune publication n'a été détectée sur les effets des différentes températures de couleurs ou des différentes lampes sur les Grands mammifères.

II. Petits Mammifères hors chiroptères

II.1 Réponses comportementales

Une étude allemande réalisée par Hoffmann et col. (2019) a permis de mettre en évidence que le Campagnol roussâtre (*Myodes glareolus*) et la Souris des champs (*Apodemus agrarius*) modifient leur utilisation de l'espace si elles sont éclairées par des LEDs de 3000 K avec un éclairement moyen de 5,8 lx durant la nuit. Celles-ci réduisent leur activité diurne et les différences d'aire d'activité entre le jour et la nuit disparaissent lorsqu'elles sont soumises à l'éclairage artificiel nocturne. De plus, cette étude a démontré que sous l'effet de l'éclairage, 2 individus de la même espèce ont tendance à plus s'éloigner l'un de l'autre, être actif sur des créneaux horaires différents et avoir moins de territoire en commun.

Bliss-Ketchum et col. (2016) ont démontré aux Etats-Unis que la Souris sylvestre (*Peromyscus maniculatus*) utilisait moins fréquemment les passages à faune sous-terrain s'ils sont éclairés par des LEDs de 2700 K ou 3000 K avec un éclairement respectif de 172 lx et 54 lx. Ces résultats sont cohérents avec une étude chinoise de Zhang et col. (2020) dans laquelle la Gerboise de Sibérie (*Allactaga sibirica*) se montre plus vigilante et recherche moins de nourriture lorsqu'elle est éclairée de 15 lx (température de couleur non renseignée).

En résumé, l'ensemble des études compilées concernent des espèces de rongeurs. Ceux-ci, sous l'effet de l'éclairage nocturne artificiel, voient leurs rythmes circadiens perturbés, une augmentation de leurs vigilances aux prédateurs la nuit, un temps de recherche de nourriture diminué et une modification de l'utilisation de l'espace avec une répulsion à la lumière.

II.2 Réponses métaboliques

La synthèse de Grubisic et col. (2019) présente 7 études, concernant également toutes des rongeurs. Toutes présentent des résultats significatifs de diminution de la mélatonine à l'éclairage. Le plus petit niveau testé a été de 0,2 lx sur des rats de laboratoire (Crl:NIH-Foxn1^{tmu}). Son taux de mélatonine plasmatique a diminué de 88 % avec le traitement. La mélatonine plasmatique a également été mesurée sur le Hamster russe (*Phodopus sungorus*) en réaction à un niveau de radiance. L'éclairage a été réalisé par tranche de 15 minutes sur 60 % de la phase nocturne. Aucun effet n'a été mesuré avec un niveau de radiance 0,003 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ mais la mélatonine décroît d'environ 60 % lorsque la radiance est de 0,03 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ et d'environ 90 % lorsqu'elle est supérieure à 0,3 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Un éclairage durant toute la nuit de $8,07 \pm 0,95 \text{lx}$ ($3,31 \pm 0,38 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) réduit d'environ 95 % la mélatonine plasmatique du Rat de laboratoire.

En résumé, les études compilées concernent en totalité des rongeurs. Ceux-ci, sous l'effet de l'éclairage nocturne artificiel, voient leur mélatonine décroître fortement dès environ 8 lx (à l'exception du Rat-Taupe) et 0,03 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

II.3 Synthèse

Les Petits Mammifères, notamment les rongeurs, sont plutôt lucifuges et voient leur comportement modifié avec l'éclairage, vis-à-vis des individus de mêmes espèces et vis-à-vis des prédateurs.

Le niveau de mélatonine décroît fortement avec l'éclairage. Des effets ont été mesurés à des niveaux d'éclairage d'environ 8 lx et 0,03 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Un effet de seuil semble avoir été mesuré sur le Hamster russe où il n'y aurait pas d'effet sur la mélatonine à une radiance inférieure ou égale à 0,003 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

II.4 Implications en termes de gestion

Les articles étudiés n'ont pas permis d'identifier un seuil d'éclairage pour observer l'effet de répulsion chez ces espèces. Il sera retenu qu'il est nécessaire d'éclairer le moins possible pour réduire l'effet de répulsion des Petits Mammifères.

Aucune publication n'a été détectée sur les effets des différentes températures de couleurs ou des différentes lampes sur les Petits Mammifères.

III. Chiroptères

III.1 Réponses comportementales

III.1.a Gîte

Downs et col. (2003) ont démontrés au Royaume-Uni que le nombre de Pipistrelle pygmée (*Pipistrellus pygmaeus*) en sortie de gîte faiblit si celui-ci est éclairé avec de la lumière blanche, bleu ou rouge, peu importe

l'éclairage (éclairage minimum mesuré : 200 lx). Ils ont néanmoins remarqué que l'utilisation de filtre rouge avec un éclairage inférieur à 80 lx n'avait pas impacté la sortie des Pipistrelles pygmées sur 1 des 2 gîtes suivis.

Lors d'une étude sur 5 églises en Angleterre dans laquelle il était testé l'éclairage comme répulsif pour les chauves-souris, Packman et col. (2015) ont mis en évidence que le Murin de Natterer s'éloignait des zones éclairées et que, si l'entrée de son gîte était directement éclairée, cela pouvait le piéger à l'intérieur et, à terme, causer la mort de plusieurs individus. Dans cette même étude, il a été remarqué qu'à l'inverse, les Pipistrelles étaient plus tolérantes à l'éclairage du gîte et pouvaient même s'y habituer. Les caractéristiques de la lumière utilisée ne sont cependant pas présentées dans ce rapport.

En Hongrie, Boldogh et col. (2007) ont suivi des colonies de Grand Rhinolophe (*Rhinolophus ferrumequinum*), Murin à oreilles échancrées (*Myotis emarginatus*) et Petit Murin (*Myotis oxygnathus*). Il apparaît pour ces 3 espèces, lorsque l'entrée du gîte est éclairée, qu'elles ont une heure d'émergence retardée voir annulée. Cela a pour effet de réduire le temps de chasse des adultes, dont les femelles allaitantes, et dans le pire des cas induire de la mortalité. Il a été observé que les juvéniles de ces colonies étaient en moyennes plus petits. Les niveaux d'éclairage n'ont cependant pas été renseignés.

Enfin Straka et col. (2020) ont testé 3 couleurs de LEDs à l'entrée de cavités naturelles en Bulgarie abritant des colonies de chauves-souris : Blanc neutre, rouge et ambré. L'éclairage a été réglé entre 10 et 15 lx pour des mesures à 2 m sous l'éclairage. Les colonies concernées comprenaient le Rhinolophe euryale (*Rhinolophus euryale*), le Rhinolophe de Ménély (*Rhinolophus mehelyi*), le Minioptère de Schreibers (*Miniopterus schreibersii*) et le Murin de Capaccini (*Myotis capaccinii*). Il apparaît que toutes les couleurs ont eu pour effet de réduire l'activité de ces espèces à la sortie des cavités, le rouge étant celle avec l'effet le moins fort.

En résumé, l'éclairage des gîtes de chiroptères peut causer une baisse d'activité, de la mortalité et de l'affaiblissement des jeunes et des adultes. Les caractéristiques de l'éclairage ont été peu renseignées sur les études les plus anciennes, néanmoins la lumière rouge semble être la moins impactante bien qu'à éviter.

III.1.b Chasse

Les études sont nombreuses sur le sujet, surtout depuis les 5 dernières années. Nous présentons ici les plus récentes et compléterons si nécessaire avec des études plus anciennes.

Au Pays-Bas, Barré et col. (2021) ont réalisé de la trajectographie et ont rassemblé les résultats selon 3 groupes au comportement de vol proche : les Pipistrelles, les Sérotines/Noctules et les Murins/Oreillard. L'étude conclut que les 3 groupes déplacent leurs zones de chasse des lisières et milieux ouverts vers l'intérieur des milieux fermés quand ceux-ci sont éclairés par des LEDs blanches ou rouges d'un niveau d'éclairage inférieur à 10 lx (en moyenne au sol). Ces résultats corroborent avec des modélisations réalisées à partir de données de sciences participatives (Pauwels et col., 2019 ; Azam et col., 2016) où l'activité était, à une échelle paysagère, éloignée de sources de pollution lumineuse.

L'effet attractif ou répulsif de la lumière est dépendant du contexte. En effet, les Pipistrelles et les Noctules peuvent chasser près des luminaires s'il y a des proies. Azam et col. (2018) ont ainsi mis en évidence un effet attractif des lampes à vapeur de Sodium haute pression (HPS) où l'éclairage était en moyenne inférieur à

10 lx sous le luminaire pour les Noctules et les Pipistrelles. Ce comportement de chasse aux luminaires a souvent été mis en évidence dans la littérature scientifique pour ces espèces (Lacoeuilhe et col., 2014). Voigt et col. (2020) ont encore validé ces observations en étudiant le vol de Noctules communes (*Nyctalus noctula*) équipées de GPS. Les Murins, les Oreillards et les Rhinolophes restent cependant lucifuges (Straka et col., 2020 ; Azam et col., 2018 ; Spoelstra et col., 2017).

Il est à noter cependant que bien que certaines espèces tirent profit de l'agglomération d'insectes aux luminaires, celle-ci est susceptible de provoquer une augmentation de la compétition intra et interspécifique. Il apparaît que pour l'ensemble des espèces européennes, la compétition intra spécifique est assez forte en raison des interférences acoustiques et que la compétition inter spécifique est dépendante des espèces (Lewanzik et col., 2019 ; Roeleke et col., 2018).

Les milieux boisés formeraient donc des « refuges » en milieu urbain pour les chauves-souris (Barré et col., 2021 ; Straka et col., 2019), notamment pour les espèces aux vols lents (Haddock et col., 2019, Azam et col., 2018), et permettraient de « diluer » les proies dans le milieu.

Bolliger et col. (2020a) ont testé l'effet attractif de LEDs de différentes températures de couleur (2700 K et 6500 K) sur les chauves-souris d'une part, et les insectes d'autre part, en milieu péri-urbain en Suisse. La température de couleur n'a pas eu d'effet significatif sur les chauves-souris inventoriés, en majorité la Pipistrelle commune (*Pipistrellus pipistrellus*), cependant l'activité des chauves-souris a été significativement liée à la quantité d'insectes attirés par les luminaires. En contexte péri-urbain, la température de couleur ne semble pas permettre de réduire l'effet de la lumière sur le comportement de chasse.

Bolliger et col. (2020b), en Suisse, ont testé l'effet de la détection de présence sur l'activité des chauves-souris et l'attraction des insectes le long de routes fortement éclairées (4000 et 4150 K et entre 15 et 25 lx en moyenne à 2 m des luminaires). Il en résulte que la détection de présence réduit l'attraction des insectes aux luminaires notamment des hétéroptères et réduit l'activité des Pipistrelles.

Dans le Parc Régional du Gâtinais Français, Azam et col. (2015) ont comparé l'extinction en milieu de nuit avec un éclairage toute la nuit de 32 lx en moyenne. Il apparaît que l'extinction en milieu de nuit augmente l'activité des Oreillards et de la Noctule commune (*Nyctalus noctula*) et réduit celle de la Pipistrelle commune (*Pipistrellus pipistrellus*). Les auteurs notent cependant la limite de cette pratique et préconise d'éteindre plus tôt pour que ce soit favorable aux espèces « au vol lent ».

Il est à noter que Voigt et col. (2018) ont mis en évidence que les LEDs rouges à moins de 2 lx en moyenne ne sont pas attractives pour les proies de la Pipistrelle de Nathusius (*Pipistrellus nathusii*) et la Pipistrelle pygmée (*Pipistrellus pygmaeus*) alors que les LEDs blanches chaudes le sont.

En résumé, les luminaires sont répulsifs pour les espèces aux vols lents comme les Murins, Rhinolophes et Oreillards qui ne peuvent pas accéder aux proies attirées par la lumière. Les Pipistrelles, Sérotines et Noctules peuvent puiser dans ce stock mais l'agglomération des proies est favorable à la compétition intra et inter spécifique. Les milieux boisés non-éclairés sont des refuges pour les chauves-souris. Des mesures de réduction de l'éclairage ont été testés et il semble que plus l'espace est éclairé, plus il est défavorable aux chauves-souris. La détection de présence réduit la quantité d'insectes attirés, l'extinction en milieu de nuit est favorable aux Oreillards, Pipistrelles et Noctules mais doit être pratiquée le plus tôt possible pour être favorable aux autres espèces, la température de couleur ne semble pas influencer l'attraction des proies et

des chauves-souris, en tous cas en milieu péri-urbain et enfin les LEDs rouges ne sont pas attractives pour les proies des chauves-souris.

III.1.c Transit

L'activité de transit chez les chiroptères est essentielle car de celle-ci dépend l'accès aux zones de chasses et aux gîtes.

Stone et col. (2009), en 2007 en Angleterre, ont éclairé des haies empruntées par le Petit Rhinolophe (*Rhinolophus hipposideros*) par des lampes SHP à hauteur de 51,67 lx en moyenne. Il est apparu que cette espèce a fortement réduit son activité au niveau de la haie. En 2009, cette même équipe a renouvelé l'expérience (Stone et col., 2012) avec des LEDs blanches froides (4000 K) et 3 niveaux d'éclairage : 3,6 lx, 6,6 lx et 49,8 lx en moyenne (mesuré horizontalement et tenu à 1,7 m du sol). Ils ont obtenu le même résultat pour le Petit Rhinolophe et les Murins, même avec le niveau d'éclairage le plus bas. L'activité des Pipistrelles, Sérotines et Noctules n'a pas été impactée par l'éclairage.

En 2014, Zeale et col. (2018) ont également éclairé des haies près de gîtes de Petits Rhinolophes mais d'un seul côté à hauteur de 55 lx en moyenne avec plusieurs types d'éclairage : lampe SHP et LED blanche neutre, LED rouge et LED verte. Le Petit Rhinolophe a, là encore, réduit son activité du côté éclairé, quel que soit le type d'éclairage, y compris la LED rouge. Il est apparu néanmoins que l'activité de cette espèce s'est déportée du côté de la haie non-éclairée. La LED rouge n'a eu aucun effet sur les autres espèces détectées, alors que concernant les autres types d'éclairage, les Murins les ont évités et les Pipistrelles y ont été plus actives. L'activité des Sérotines et Noctules n'a été impacté par aucun type d'éclairage.

Il a été détecté 2 publications sur l'effet de l'éclairage au niveau des passages sous-terrain routier. La première présente une étude sur des ponts et ponceaux en Australie, éclairés par des LEDs blanches de 5500 à 6500 K, et avec un niveau d'éclairage moyen de 49,7 lx pour les ponts et 94,2 lx pour les ponceaux (Bhardwaj et col., 2020). Une tendance à l'évitement a été détectée pour la majorité des espèces ce qui rend inefficace l'infrastructure pour ces espèces. La deuxième étude est de Spoelstra et col. (2018) et a uniquement porté sur les ponceaux aux Pays-Bas et le Murin de Daubenton (*Myotis daubentoni*). Il a été testé des LEDs de couleur blanche, rouge et verte avec un niveau d'éclairage de 5 lx en moyenne à la surface de l'eau. Il apparaît que le Murin de Daubenton a été actif indépendamment de l'éclairage.

Certaines espèces transitent sur de grandes distances entre leurs gîtes d'hibernation et leurs gîtes d'été et sont dites « migratrices ». Voigt et col. (2018) ont testé la réaction de 2 d'entre elles, la Pipistrelle de Nathusius (*Pipistrellus nathusii*) et la Pipistrelle pygmée (*Pipistrellus pygmaeus*), à 2 types d'éclairage, LEDs blanches chaudes à 3,3 lx et LEDs rouges à 1,8 lx, dans un couloir de migration de la Mer Baltique. Il apparaît que l'activité de ces espèces augmente aux 2 types d'éclairage mais pas pour les mêmes raisons. L'activité aux LEDs blanches correspondait à une activité de chasse (signaux acoustiques caractéristiques) tandis que ces espèces ne chassaient pas aux LEDs rouges. Les LEDs blanches provoqueraient donc une attraction indirecte par attraction de proies tandis que les espèces migratrices semblent être attirées par les LEDs rouge directement. Voigt et col. (2017) ont testé, dans le même contexte, des LEDs vertes et ont également observé un effet d'attraction direct, non en raison de la présence de proies.

Enfin, la modélisation spatiale de l'activité à partir de données Vigie-Chiro à l'échelle d'agglomérations a permis de mettre en évidence que pour la Pipistrelle commune, espèce considérée comme tolérante à la pollution lumineuse, l'activité était concentrée aux zones les moins éclairées (Pauwels et col., 2019).

En résumé, il apparaît que les lumières blanches, LED ou SHP, peuvent bloquer le transit des Rhinolophes et des Murins, même à un niveau d'éclairage inférieur à 5 lx tandis que les Pipistrelles, les Sérotines et les Noctules sont moins impactées à une échelle locale. Il apparaît néanmoins qu'à une échelle paysagère, la pollution lumineuse influence les déplacements de la Pipistrelle commune. Les LEDs rouges semblent être moins répulsives au transit de l'ensemble des chauves-souris excepté des Rhinolophes. Celles-ci peuvent par contre perturber les migrations de certaines espèces comme la Pipistrelle de Nathusius ou la Pipistrelle pygmée. L'éclairage des passages sous-terrain peut rendre infonctionnel ces corridors de transit excepté peut être avec un éclairage inférieur ou équivalent à 5 lx au sol.

III.2 Réponses métaboliques

Aucune publication traitant des réponses métaboliques des chauves-souris n'a été référencée dans la synthèse de Grubisic et col. (2019) et n'a été détectée par ailleurs.

III.3 Synthèse

Il apparaît que les Chauves-souris, notamment les Rhinolophes, les Murins et les Oreillard, sont très sensibles à la pollution lumineuse. De nombreux paramétrages d'éclairage ont été testés. Il ressort que les LEDs blanches ont un effet répulsif sur la totalité des espèces sauf en cas d'attraction de proies, où il a été constaté un effet indirectement attractif pour les Pipistrelles, les Sérotines et les Noctules. Cet effet répulsif peut avoir des conséquences importantes sur les espèces les plus sensibles comme l'affaiblissement des juvéniles au cas où l'entrée du gîte est éclairée, l'augmentation de la compétition des espèces chassant aux luminaires et la perte de territoire de chasse pour les autres ou la perte de fonctionnalités de corridors écologiques.

III.4 Implications en termes de gestion

Parmi les mesures de réduction des nuisances testées :

- l'extinction en milieu de nuit est favorable à plusieurs espèces mais doit être pratiquée suffisamment tôt pour profiter aux espèces les plus sensibles (pas d'horaires définis) ;
- en milieu périurbain, la diminution de la température de couleur ne semble pas suffisante pour réduire l'effet d'attraction sur les insectes et la chasse des chauves-souris ;
- les îlots boisés en milieux éclairés peuvent servir de refuges « d'obscurité » à la majorité des espèces de chauves-souris ;
- la détection de présence pourrait être favorable aux chauves-souris en concentrant moins les proies aux luminaires et donc en réduisant la compétition ;

- les LEDs rouges à faible éclairage (environ 5 lx) sont les moins impactantes pour les chauves-souris, que ce soit à la sortie du gîte, sur les routes de transit ou les zones de chasses. Elles peuvent néanmoins perturber la migration de certaines espèces comme la Pipistrelle de Nathusius ou la Pipistrelle pygmée ;
- indépendamment du type d'éclairage, le niveau d'éclairage doit être le plus bas possible.

IV. Amphibiens

IV.1 Réponses comportementales

Au Pays-Bas, van Grunsven et col. (2016) ont éclairé des portions de routes à hauteur de 10 lx en moyenne avec des LEDs blanches chaudes, des LEDs rouges et des LEDs vertes et ont observé la migration du Crapaud commun (*Bufo bufo*). Celui-ci a eu tendance à éviter les portions éclairées avec les LEDs blanches et vertes mais pas celles éclairées avec les LEDs rouge.

Au nord-est de Lyon, Touzot et col. (2019) ont testés ex situ l'effet de l'exposition nocturne de Crapauds communs à 3 niveaux d'éclairage de LEDs blanches chaudes : 0,1 lx, 5 lx et 20 lx. A cette fin, ils ont quantifié 1) les proies consommées, 2) les déplacements hors chasse, 3) l'énergie dépensée et 4) l'évolution de la masse corporelle. Concernant le comportement, aucune modification sur la quantité de proies consommées n'a été détectée mais une réduction des déplacements hors chasse de 56 % à 5 lx et 73 % à 20 lx sur 24 heures. Cette étude corrobore avec celle de Van Grunsven et col. (2016) concernant les déplacements et met en évidence l'effet des LEDs blanches chaudes dès 5 lx sur les déplacements du Crapaud commun mais pas la consommation de nourriture.

Concernant la reproduction, les Crapauds communs soumis à un éclairage de 0,1 et 5 lx en laboratoire peuvent se détacher de la femelle avant fertilisation des œufs tandis que ceux soumis à 0,01 lx ne le font pas. Ceux soumis à un éclairage de 5 lx voient leurs taux de fertilisation réduit de 25 % (Touzot et col., 2020).

En Australie, Komine et col. (2020) ont testé l'effet de ballons fluorescent avec un éclairage de 2 à 8 lx sur une espèce invasive, le Crapaud buffle (*Rhinella marina*). Cette espèce a augmenté de façon importante sa consommation de proies sous les lampes.

En résumé, l'éclairage a un effet sur la migration, le métabolisme et la capture de proies chez, a minima, le Crapaud commun. Dès 5 lx, même avec des LEDs blanches chaudes, des effets importants sur les déplacements et le métabolisme ont été mesurés. Il a également été identifié en Australie que l'éclairage pouvait favoriser la consommation de proies pour les espèces invasives comme le Crapaud buffle.

IV.2 Réponses métaboliques

En reprenant les résultats de Touzot et col. (2019) sur le métabolisme, l'exposition nocturne de Crapauds communs à 3 niveaux d'éclairage de LEDs blanches chaudes (0,1 lx, 5 lx et 20 lx) a eu pour effet sur le métabolisme :

- 1) aucune modification sur la masse corporelle ;
- 2) une dépense énergétique qui n'est pas significativement modifiée dans sa quantité mais dans sa répartition. En effet, bien que la dépense énergétique liée aux déplacements ait été réduite (18 % à 5 lx et 38 % à 20 lx), la dépense énergétique hors déplacements (fonctionnement des organes, activité nerveuse etc.) a augmenté de 28 % à 5 lx et 58 % à 20 lx.

Cette étude met en évidence l'effet des LEDs blanches chaudes dès 5 lx sur le métabolisme du Crapaud commun qui pourrait, à long terme, être délétère sur la capacité de survie des populations.

La synthèse de Grubisic et col. (2019) mentionne un manque de publications sur l'effet de l'éclairage sur la production de mélatonine chez les amphibiens. Il a été remarqué que ce manque d'information est surprenant pour un groupe dont les populations sont largement menacées. La pollution lumineuse est un facteur identifié comme à considérer pour leurs préservations ou leurs restaurations.

IV.3 Synthèse

Le Crapaud commun (*Bufo bufo*) a fait l'objet de 3 publications où il a été mentionné l'effet délétère de la lumière blanche (même chaude) dès 5 lx et verte sur les déplacements et la reproduction de cette espèce. Un éclairage nocturne blanc ne semble pas influencer la prise de nourriture mais augmente les dépenses énergétiques et réduit la fertilité dès 5 lx. À long terme, cela impliquerait une fatigue des individus et une augmentation de la sensibilité des populations.

IV.4 Implications en termes de gestion

La lumière blanche ou verte est à éviter sur les zones de reproduction et de migration du Crapaud commun, même à faible éclairage.

Les LEDs rouges ne semblent pas gêner les déplacements du Crapaud commun et pourrait être une mesure à mettre en place sur des portions de routes où migrent cette espèce. En l'état des connaissances, il est préférable de circonscrire ces préconisations uniquement au Crapaud commun et d'éviter d'éclairer au maximum les zones de déplacement des autres amphibiens.

V. Poissons

V.1 Réponses comportementales

Une étude de Pulgar et col. (2019) a été réalisée sur *Girella laevis*, un poisson de roche des côtes ouest d'Amérique du Sud. Des juvéniles ont été capturés dans des mares et une expérimentation en laboratoire a été réalisée en reproduisant l'éclairage moyen mesuré de jour, soit 7222 lx, et de nuit, soit 70 lx (les mares étant éclairées en conditions naturelles). Un groupe « témoin » n'a pas été éclairé la nuit. Il est précisé que les longueurs d'ondes de l'éclairage en milieu naturel et de celles testées sur les juvéniles n'ont pas été mesurées. Il ressort que, par rapport au groupe non-soumis à un éclairage nocturne, les juvéniles sont plus

actifs, consomme plus d'oxygène et ont un cycle circadien (jour/nuit) et circatidal (marée haute/basse) perturbé.

Brüning et col. (2010) ont évalué l'effet de l'éclairage sur le développement de quatre espèces, la Perche eurasienne (*Perca fluviatilis*), le Gardon (*Rutilus rutilus*), le Sombre (*Alburnus alburnus*) et la Chevesne (*Leuciscus cephalus*). Des œufs ont été incubés dans deux conditions de lumière différentes : 1) photopériode de 14 h de lumière (tube fluo : 3 500 lx, 5 500 K) /10 h d'obscurité et 2) un éclairage continu (tube fluo : 3 500 lx, 5 500 K). L'éclairage nocturne augmente de 50 % le temps d'éclosion du Gardon et du Sombre et réduit celui de la Chevesne. L'apparition de l'obscurité semblait déclencher l'éclosion de la Perche. Le gonflement de la vessie natatoire était favorisé par la lumière continue pour la Chevesne et le Sombre mais n'a pas affecté le Gardon. Ils concluent que l'éclairage artificiel nocturne pourrait avoir un effet sur les éclosions et le remplissage de la vessie natatoire en masquant le changement jour-nuit et diminue ainsi l'effet de déclenchement. Cependant, les réactions étaient spécifiques à l'espèce et aucun effet délétère de la lumière artificielle la nuit n'a été identifié sur les premiers stades de vie.

Nelson et col. (2021) ont éclairé un cours d'eau en Californie avec des projecteurs LEDs de 20 000 lx et ont évalué la prédation de jeunes Saumon royaux (*Oncorhynchus tshawytscha*) selon la distance à la source lumineuse. Ils ont également estimé l'éclairage à 1 m de profondeur, en tenant compte de la turbidité, à 68 lx au plus près du projecteur et à moins de 0,5 lx à plus de 50 m. Il apparaît que les jeunes Saumon royaux sont significativement plus souvent prédatés en zone éclairée, à moins de 50 m du projecteur donc avec un éclairage inférieur à 0,5 lx, qu'en zone non éclairée.

Enfin, 2 études publiées en 2021 révèlent une activité dépendante de l'éclairage. La première de Miner et col. (2021) couple 2 expérimentations :

- l'une a été réalisée en laboratoire où un groupe de Gambusies (*Gambusia affinis*) a été exposé avec un cycle 14h/10h jour/nuit avec le jour simulé par un éclairage LED blanche de 2 380 lx et la nuit sans éclairage, et un autre avec un cycle 14h/10h jour/ALAN où l'ALAN était une LED blanche de 246 lx,
- l'autre était réalisée en mésocosme¹ où un groupe n'était pas éclairé la nuit et l'autre l'était avec des LEDs de 5000 K rendant un éclairage de 260-280 lx à hauteur d'eau.

Les 2 expérimentations ont donné des résultats similaires : l'activité des Gambusies est réduite s'ils sont soumis à un éclairage nocturne mais la reproduction, la survie et la croissance n'est pas impactée. La seconde étude de Keep et col. (2021) présente une étude comportementale en laboratoire de plusieurs espèces australiennes afin de déterminer s'il existe un seuil d'éclairage où le comportement est modifié et si oui, lequel. Ils ont trouvé que les réponses comportementales reflétaient largement les modèles d'activité quotidienne des espèces ; les espèces diurnes *Craterocephalus stercusmuscarum* et *Retropinna semoni* ont préférées les zones éclairées, tandis que *Macquaria novemaculeata*, nocturne / crépusculaire, a préféré les zones assombries.

En résumé, les ALANs influence l'activité nocturne des poissons d'eaux douces ou d'eaux salées, les relation proies/prédateurs et peuvent modifier les périodes d'éclosion de certaines espèces d'eaux douces.

¹ C'est un lieu confiné et contrôlé ou semi-contrôlé où un expérimentateur peut faire varier tout ou partie des paramètres du milieu ; sol, hygrométrie, température, teneur de l'air en CO2 ou polluants, etc.

V.2 Réponses métaboliques

La synthèse de Grubisic et col. (2019) mentionne que pour la plupart des espèces de poissons testées, une lumière blanche de 1 lx était suffisante pour que la mélatonine plasmatique soit inférieure à 70 % par rapport à des conditions non-éclairées, sauf pour le saumon de l'Atlantique (*Salmo salar*) et le Bar européen (*Dicentrarchus labrax*), où la production était inférieure à 90 % autour de 1 lx sans différence statistiquement significative. Les réponses les plus fortes à la lumière la nuit ont été mesurées chez les espèces tropicales. En effet, la lumière de pleine lune (estimée à 0,3 lx) était suffisante pour que la mélatonine plasmatique moyenne soit inférieure à 45 % de celle en obscurité. La Tanche (*Tinca tinca*) avait des niveaux de mélatonine représentant 43 à 45 % par rapport à celle mesurée à l'obscurité à différents niveaux de l'éclairage. De même, la mélatonine a été réduite en fonction de l'intensité de la lumière chez le Bar européen et l'Omble chevalier (*Salvelinus alpinus*). Dans ces études, la rythmicité de la production de mélatonine était détectable à un éclairage nocturne de 1 lx mais complètement appauvri à 10 lx et 100 lx chez la Perche et le Gardon eurasiens. Une autre étude récente a montré que, en dessous de 1 lx, la production de mélatonine a été significativement réduite à 0,01 lx et 0,1 lx, mais la rythmicité a été maintenue dans la Perche eurasienne.

Trois études sélectionnées dans cette synthèse ont examiné les effets de l'éclairage coloré pendant la scotophase¹ sur la mélatonine plasmatique. Chez le Gardon, l'éclairage de toutes les couleurs appliquées (bleu, vert, rouge) réduit de façon similaire la mélatonine. Pour la Perche eurasienne, LEDs vertes et rouges réduisent de la même manière la mélatonine tandis que les LED bleues réduisent la mélatonine dans une moindre mesure que la lumière rouge ou verte. Chez le Bar européen, à de faibles intensités (2,4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$), la suppression de mélatonine était moins faible pour la lumière rouge (640 nm, environ 3 lx) que pour la lumière verte (544 nm, environ 11 lx) et la lumière bleue (454 nm, environ 2 lx) et était même similaire au témoin dans l'obscurité. À des intensités plus élevées (6 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$), la lumière rouge (environ 7 lx) et la lumière bleue (environ 5 lx) étaient les plus suppressives, et la lumière verte (environ 28 lx) était la moins suppressive, mais tous les traitements colorés avaient pour effet une mélatonine plasmatique significativement plus faible que le témoin sombre.

V.3 Synthèse

Un éclairage sur un plan d'eau, aussi faible soit-il, perturbe l'activité nocturne des poissons, leurs métabolismes et leurs phénologies de développement et de reproduction. Cependant, aucun effet sur la survie des populations n'a été mesurée. A moins de 3 lx, la lumière rouge semble ne pas avoir d'effet sur le Bar européen

V.4 Implications en termes de gestion

Il est à éviter d'éclairer les plans d'eau, même de manière résiduelle. Néanmoins, la lumière rouge peut être envisagée pour les éclairages les plus près des plans d'eaux, notamment près du bord de mer.

¹ Période d'obscurité d'un cycle jour/nuit

VI. Oiseaux

VI.1 Réponses comportementales

VI.1.a Migration

Au Pays-Bas, des lampes aux halogénures métalliques de 100W couvert de filtres rouges, verts et bleus ont été testées par rapports aux mouvements migratoires des oiseaux dans la Mer du Nord (Poot et col., 2008). Les lumières rouges et blanches émis détournent les oiseaux migrateurs de leurs routes tandis que les bleues et vertes ne semblent pas avoir d'effet. Cette observation corrobore avec les résultats de Watson et col. (2016) aux Etats-Unis où le nombre de cris émis par les oiseaux en migration près des villes sont 3 fois plus élevés qu'en milieu rural, où la pollution lumineuse est plus faible. La lumière modifie donc le comportement des oiseaux migrateurs.

Le suivi d'un monument fortement éclairé (pas de détails donnés dans l'étude) à New York durant 7 nuits par an pendant 7 ans a révélé une très forte attraction du bâtiment pour les oiseaux migrateurs nocturnes avec une estimation d'environ 1,1 million d'oiseaux dont la migration a été impactée (déviation, ralentissement etc.) (Vand Doren et col., 2017).

Enfin, il a été observé que les Hirondelles noires (*Progne subis*) soumises à un éclairage nocturne (pas de détail dans la publication) commencent leurs migrations printanières plus tôt que celles non-soumises à un éclairage (Smith et col., 2021).

VI.1.b Reproduction et domaine vital

Au Pays-Bas, une étude sur la Mésange charbonnière (*Parus major*) a montré que la nidification démarre globalement plus tôt dans l'année lorsque les individus sont soumis à un éclairage aux LEDs blanches ou vertes de moins de 10 lx comparé à un éclairage rouge ou sans éclairage (Dominoni etcol., 2019).

Une expérience menée en Allemagne sur des Merles noirs (*Turdus merula*) en captivité a révélé que des individus soumis à un éclairage nocturne de 0,3 lx ne développent pas leurs organes de reproduction tandis que des individus « témoins » non-soumis à un éclairage nocturne les développent normalement (Dominoni et col., 2013).

Dominoni et col. ont équipé des Merles noirs (*Turdus merula*) d'enregistreurs d'intensité lumineuse ainsi que de radio-track au printemps, en période de reproduction de cette espèce. L'activité des merles a ainsi pu être corrélée avec l'intensité lumineuse reçue. Cette expérience a été menée dans un parc urbain à Munich et dans une forêt rurale à 40 Km de Munich. En mars, il a ainsi été mesuré que les merles en milieux urbains ont une journée perçue plus longue de 49 minutes en moyenne cumulant 19 jours de décalage sur la période de reproduction. La maturité sexuelle observée sur le terrain a également un décalage de 19 jours entre le parc urbain et la forêt rurale. L'éclairage nocturne peut donc très probablement influencer l'activité journalière et saisonnière de reproduction du Merle noir.

En Argentine, Rodriguez et col. (2020) ont étudié en zone périurbain pour la Chevêche des terriers (*Athene cunicularia*) : 1) la disponibilité des proies avec des pièges « Barber » sous des lampadaires et dans des sites

non-éclairés; 2) le régime alimentaire en analysant les pelotes de rejections ; 3) l'utilisation de l'espace en équipant les chouettes reproductrices de GPS ; 4) la sélection de l'habitat de nidification en comparant les variables environnementales au nid et des emplacements aléatoires ; et 5) la productivité en corrélant les variables environnementales avec le nombre de jeunes volants. Il en résulte que : 1) les lampadaires ont modifié la disponibilité des invertébrés, les attirant vers les zones éclairées ; 2) le régime alimentaire des chouettes ressemblait davantage aux invertébrés piégés sous les lampadaires que dans les zones non-éclairées ; 3) l'utilisation de l'espace par les chouettes reproductrices a été influencée par les lampadaires, celles-ci ayant passées plus de temps autour des sources lumineuses, en particulier pendant la nuit ; 4) la principale caractéristique influençant le choix de l'habitat de nidification était la distance par rapport à l'éclairage public. Les chouettes ont sélectionné des zones proches des lampadaires pour la nidification. Enfin, la productivité n'a été expliquée par aucune des variables d'habitat. L'éclairage modifie donc l'utilisation de l'espace en période de reproduction de la Chevêche des terriers.

Enfin en Suisse, Sierro et Erhardt (2019) ont testé si l'abandon d'espaces favorables à l'Engoulevent d'Europe (*Caprimulgus europaeus*) était lié à l'abandon des proies ou à l'augmentation de la pollution. Il est apparu que, la quantité de proie n'a pas beaucoup évolué depuis ces 30 dernières années voire a augmenté pour certaine tandis que la pollution lumineuse est 2 à 5 fois plus élevée dans les espaces abandonnés. Sierro et Erhardt préconise d'éviter que les sites de reproduction de l'Engoulevent d'Europe soient éclairés à plus de 0,005 lx afin d'éviter l'abandon des sites.

VI.1.c Sommeil

Au Pays-Bas, van Hasselt et col. (2020) ont étudiés l'effet de l'éclairage urbain (caractéristiques non-décrites) sur le temp de sommeil de la Bernache nonnette (*Branta leucopsis*). Celle-ci dors moins lorsqu'elle est soumise à la pollution lumineuse. La couverture nuageuse amplifie fortement cet effet. Cette conclusion est la même que celle formulée par Aulsebrook et col. (2021) dans une synthèse de l'effet de la lumière nocturne sur le temp de sommeil des oiseaux. Celle-ci signale néanmoins que si l'effet de l'éclairage nocturne sur le sommeil des oiseaux est connu comme l'importance du sommeil sur le développement des individus et notamment des jeunes, l'effet de la lumière nocturne sur la survie des individus est encore méconnu.

VI.1.d Mortalité des jeunes oiseaux marins type « Pétrels »

Les oiseaux pélagiques, c'est-à-dire qui passent une grande partie de leur vie en mer, nichent sur terre. Il est observé, depuis plus d'une trentaine d'année au minimum, un effet d'attraction de ces oiseaux vers la lumière artificielle nocturne, notamment chez les jeunes lors de leurs premiers vols. Cela cause dans de nombreux cas des collisions et la mortalité des individus.

Lors d'une synthèse réalisée par Rodriguez et col. (2017) sur la mortalité liée à la pollution lumineuse des oiseaux marins, il ressort que :

- 47 îles sont concernées à travers le monde, dans tous les océans,
- le phénomène concernent principalement les Procellariidae (Fulmars, Pétrels, Puffins, etc.), Hydrobatidae (Océanites), et Oceanitidae (autres Océanites) mais aussi les Pingouins et Macareux (Alcidae) et les Eiders (Anatidae),

- parmi les 113 espèces de Procellariidae, Hydrobatidae et Oceanitidae connues, la moitié ont fait l'objet d'observation de mortalité dû à la pollution lumineuse.

Afin de réduire au maximum la mortalité des jeunes par attraction à la pollution lumineuse, Rodriguez et col. proposent un ensemble de mesures. Le Tableau 1 les présente et il a été ajouté des études jugées complémentaires à celles présentées par Rodriguez et col.

VI.2 Réponses métaboliques

Dans la synthèse de Grubisic et col. (2019), il est mentionné des études sur entre autres, le Merle noir (*Turdus merula*) et la Mésange charbonnière (*Parus major*). Le premier présente une réduction d'environ 50 % de la mélatonine plasmatique en hiver et d'environ 30 % en été lorsqu'il est éclairé toute la nuit avec une lampe à incandescence. Le deuxième présente une réduction de la mélatonine plasmatique de 50 % lorsqu'il est éclairé à moins de 5 lx toute la nuit avec une lampe LED blanche chaude.

Le virus du Nil occidental provoque chez l'humain des fièvres dans la majorité des cas et pour les formes graves des méningites et encéphalites. Les réservoirs sont les oiseaux et sont transmis à l'humain par les moustiques. La transmission entre humains est possible en cas d'échange de sang (transfusion, transplantation d'organes etc.). En Floride, une étude menée par Kernbach et col. (2020) *ex situ* a montré qu'une exposition nocturne du Moineau domestique (*Passer domesticus*) à 5 lx avec des LEDs blanches à 3000 K supprime la production de mélatonine durant la nuit. Elle a également pu mettre en avant que l'exposition des lampes de 3000 et 5000 K augmente la mortalité du Moineau domestique induite par le virus mais pas la virémie (taux de présence du virus dans le sang). Enfin, elle a montré que les Moineaux exposés à une lumière ambrée de 1800K n'avait pas plus de mortalité induite par le virus ou de virémie que par rapport aux Moineaux non-éclairés.

Enfin, une expérience menée sur la Caille peinte (*Excalfactoria chinensis*) suggère une réduction de la capacité de digestion des juvéniles lorsqu'ils sont éclairés la nuit, même avec un éclairage faible (Suepp et col., 2020). L'expérience a consisté en un éclairage d'un groupe de juvéniles depuis leurs 3 semaines jusqu'à leur maturité (9 semaines) à hauteur de 0,3 lx (même intensité que la pleine lune) avec des lumières bleues. Il en résulte une augmentation de stéatocrite dans les fèces traduisant une perte d'efficacité de digestion. La masse corporelle et la taille n'a en revanche pas été impactée. D'après les auteurs, entre autres hypothèses, la perte d'efficacité de digestion pourrait être compensée par une augmentation de la prise de nourriture avec une augmentation de l'activité nocturne. Il est souligné que l'effet de la lumière artificielle nocturne sur la digestion a été très peu étudiée sur la faune.

Tableau 1. Actions sur l'éclairage pour réduire les effets de la lumière artificielle nocturne dans les zones proches des colonies d'oiseaux marins issue - Rodriguez et col (2017) traduit et modifié

| Mesures pour minimiser l'effet de la lumière artificielle | Résultat | Niveau d'efficacité | Exemple | Références |
|--|---|---------------------|---|--|
| Extinction de l'éclairage durant la période d'émancipation des jeunes | Empêche l'attraction des jeunes | Haut | Sur Kauai, Hawaï, les lumières de toutes les installations sportives sont désactivées pendant les pics d'émancipation des jeunes du Puffin de Newell (<i>Puffinus newelli</i>). A Cilaos, La Réunion, les lampadaires sont éteints pendant la saison d'émancipation du Pétrel de Barau (<i>Pterodroma barau</i>). Les réverbères sur le pont reliant l'île Phillip à l'Australie sont éteint pendant la saison d'émancipation des jeunes du Puffin à bec grêle (<i>Ardenna tenuirostris</i>). | The Associated Press 2010 ; Rodriguez et col. 2014 |
| Réduction au minimum de l'éclairage extérieur et occultation des fenêtres | Empêche l'attraction et la collision aux fenêtres | Haut | Sur l'île de St Kilda en Ecosse, une réduction en intensité de l'éclairage extérieur couplée à une occultation des vitres des habitats a eu pour effet de réduire la mortalité de l'Océanite cul-blanc (<i>Hydrobates leucorhous</i>) mais pas du Puffin des anglais (<i>Puffinus puffinus</i>). Sur les îles de Marion et Gough, le nombre d'oiseaux impactés par la pollution lumineuse a été grandement réduit après l'extinction de l'éclairage extérieur et l'occultation des vitres des habitations avant la tombée de la nuit. | Miles et col., 2010 ; Cooper et Ryan, 1994 |
| Extinction ou réduction après minuit | Action pouvant être trop tardive par rapport aux pics d'envol des oiseaux marins qui ont lieu les premières heures de la nuit | Insuffisante | A Hawaï, le pic d'individus retrouvés échoués est 3 heures après le coucher du soleil. | Rodriguez et col., 2014 ; Reed et col., 1985 |
| Réduction de l'éclairage sur les bateaux de pêches | Empêche l'attraction et la collision aux bateaux | Haut | La réduction au minimum de l'éclairage sur les navires de pêche a permis de grandement réduire la mortalité engendrée par la pêche sur l'île Cough et l'archipel Tristan. | Glass et Ryan, 2013 |
| Canalisation du flux lumineux | Réduction de la lumière émise vers le ciel et réduction de l'attraction | Haut | A Hawaï, la canalisation du flux de l'éclairage extérieur d'un hôtel a permis de réduire de 40 % le nombre d'individus échoués à proximité. | Reed et col., 1985 |
| Modification du spectre lumineux | Réduit les collisions et la suppression de mélatonine | Non testé | Plusieurs rapports d'expériences montrent des résultats non concluants chez les oiseaux de mer comme le Puffin de Newell (<i>Puffinus newelli</i>). Plusieurs études montrent des effets négatifs sur les autres oiseaux. | Reed 1986 ; Poot et col. 2008 ; Doppler et col. 2015 ; Dominoni et col. 2016 |

VI.3 Synthèse

Les effets des ALAN ont été bien étudiés sur les oiseaux en Europe, en Amérique du Nord et en Asie, et sur leurs réponses comportementales et métaboliques.

Concernant la migration, les lumières blanches et rouges perturbent les oiseaux se traduisant par un effet d'attraction vers les sources lumineuses mais aussi potentiellement par un décalage des départs en migration.

Concernant la reproduction, il apparaît qu'un éclairage blanc, même de 0,3 lx, modifie le comportement de plusieurs espèces de passereaux par un décalage du début de saison, voire la perturbation du développement des organes de reproduction.

Une étude sur le domaine vitale de l'Engoulevent d'Europe tend à appuyer l'abandon de certains sites favorables à l'espèce en raison de l'éclairage tandis qu'une autre sur la Chevêche des terriers à valider la modification de l'utilisation des habitats, avec une attraction vers les luminaires pour les proies qui y sont accumulées.

Au niveau métabolique, l'éclairage même de 5 lx réduit la mélatonine plasmatique et augmente le taux de mortalité induit par le virus du Nil chez le Moineau domestique. Un éclairage de 0,3 lx peut également induire des difficultés de digestion qui sont compensées par une plus grande prise de nourriture.

Enfin, concernant les oiseaux marins type « Pétrels », il a été observé la mortalité de nombreuses espèces par échouage notamment lors du départ des jeunes du nid.

VI.4 Implications en termes de gestion

Pour ne pas perturber la migration des oiseaux, il conviendra de canaliser les lumières blanches et rouges afin d'éviter d'éclairer le ciel, notamment le long des principaux couloirs de migration.

Il est nécessaire d'éviter d'éclairer les arbustes et houppiers d'arbre, zones-refuges des oiseaux la nuit, afin d'éviter de perturber la reproduction.

Les espaces particulièrement favorables à l'installation d'espèces à enjeux fort de conservation doivent être maintenus dans l'obscurité afin d'assurer la capacité d'accueil de ces espèces.

Enfin, le Tableau 1 p.19 synthétise les mesures testées pour réduire la mortalité des oiseaux marins type « Pétrels ».

VII. Flore

VII.1 Réponses écophysiologicals

Une synthèse bibliographique a été réalisée par Singhal et col. (2018) et par Bennie et col. (2016) au sujet de l'impact de l'éclairage sur l'écophysiologicals des plantes. Le Tableau 2 reprend une partie de leurs éléments.

Des références récentes ont été ajoutées en complément et celles traitant d'expérience ne testant pas l'impact de la lumière artificielle sur les plantes ont été retirées.

Il apparaît que peu d'études ont testé des valeurs d'éclairement en lux ou des valeurs de température de couleurs.

Concernant les espèces exotiques envahissantes, en Allemagne, Speißer et col. (2020) ont testé sur celles-ci l'effet de tubes fluo produisant un éclairement au sol de $28,05 \pm 1,25$ lx. En mesurant leurs biomasses et en la comparant à des individus non-éclairés la nuit, il apparaît que les espèces envahissantes actuellement les plus répandues profitent de l'éclairage nocturne (+6 %), mais moins que des espèces envahissantes encore peu répandues (+48 %). Les auteurs concluent que l'éclairage artificiel est favorable, en Allemagne, à l'expansion des espèces envahissantes, et principalement à celles qui ne sont actuellement pas les plus répandues.

VII.2 Synthèse

Globalement, l'éclairage perturbe la phénologie et l'écophysiologie des espèces végétales et impacte de façon négative les pollinisateurs et les parasites.

Concernant les espèces exotiques envahissantes, l'éclairage artificiel nocturne a pour effet d'augmenter leur croissance, et notamment celle des espèces encore peu répandues.

VII.3 Implications en termes de gestion

Une réduction de l'éclairage serait favorable à une réduction des perturbations de la phénologie et de l'écophysiologie des espèces végétales ainsi qu'à une réduction des impacts sur les pollinisateurs et les parasites de certaines espèces.

Il apparaît que réduire l'éclairement, préférer une lumière de couleur ambre et éteindre à minuit est favorable à la réduction des impacts sur la reproduction des plantes.

La réduction de l'éclairage nocturne aurait également pour effet de réduire l'expansion des espèces exotiques envahissantes et notamment celles qui ne sont, à ce jour, pas encore très répandues.

Tableau 2. Réponses écophysiologicals des plantes à la lumière artificielle nocturne

| Fonction | Altération/modification | Références | Eclairage minimum/ Couleurs testées où les phénomènes sont significatifs | Type de lampe testée où les résultats sont significatifs |
|--|--|---|--|---|
| Mort cellulaire | Perturbation de l'expression génétique | Queval et col. (2007) ; | / | / |
| Récupération après stress à l'ozone | Ralentissement de la récupération | Vollsnes et col., (2009) | / | Lampe fluorescente (Vollsnes et col., (2009) |
| Photosynthèse | Réduction de l'activité photosynthétique diurne et de la capacité de captation du CO2 | Raven et col. (2006) ; Kim et col. (2015) | / | SHP (Kim et col. 2015) |
| Pollinisation | Attrait, répulsion ou destruction des pollinisateurs | MacGregor et coll. (2015); National Research Council (2007); Martinell et col. (2010), McGregor et col. (2019) | ~100 lx blanc au pied du luminaire éteint à minuit (McGregor, 2019) | LED et SHP (McGregor, 2019) |
| Floraison | Avance de la floraison de 14 jours à 1 mois pour plusieurs herbacées voire jusqu'à 1 à 2 ans pour l'orchidée <i>Cymbidium</i> « Red Fire » | Blanchard et col. (2010) ; Craig et col. (2016) ; Kim et col. (2013) | / | SHP (Blanchard et col., 2010 ; Kim et col., 2013) ; LED (Craig et col., 2016) |
| Réseau trophique | Augmentation de l'abondance de parasites et d'insectes herbivores | Martinell et col. (2010), Schoerer et col. (2019); Grenis & Murphy (2019), Bennie et col. (2015) ; Boom et col., (2020) ; | 60 lx blanc en canopée (Schoerer et col., 2019), ~20 lx en canopée de blanc 6000 K et d'ambre (Bennie et col., 2015, Bennie et col., 2018), ~7 lx blanc et vert (Boom et col., 2020) ; | SHP (Grenis & Murphy, 2019) ; Lampe fluorescente (Schoerer et col., 2019) ; LED (Bennie et col., 2015, Bennie et col., 2018 ; Boom et col., 2020) ; |
| Défoliation automnale | Retard de la défoliation automnale de 13 à 22 jours et rallongement de celle-ci de 6 à 9 jours | Škvareninová et col. (2017), | 5 lx (Škvareninová et col., 2017) | |
| Bourgeonnement | Avancement du bourgeonnement de 7,5 jours en moyenne | Ffrench-Constant et col. (2016) | / | / |
| Communautés | Modification de la trajectoire d'évolution des habitats | Bennie et col. (2017), Hey et col. (2020) | ~15 lx Ambre, Blanc, avec extinction entre minuit et 4h00 (Bennie, 2017) ; 52.75 ± 4.41 lx / 4922 K (Hey et col., 2020) | LED (Bennie, 2017; Hey et col., 2020) |

VIII. Papillons de nuit

Il est rappelé en premier lieu que les papillons de nuit sont des pollinisateurs et des proies essentielles à l'ensemble des écosystèmes. Leur mauvaise réputation vient d'un nombre limité d'espèces (Mites des vêtements, chenilles sur plantes cultivées, etc.) par rapport à la grande diversité présente en France et dans le monde. La majorité des espèces sont inféodées aux milieux naturels et la destruction des populations peut avoir des effets néfastes sur les populations locales de flore ou de faune menacées.

Il ne sera traité dans ce document que des effets directs sur les individus (réduction de la croissance, de la reproduction etc.) et non des effets des perturbations du réseau trophique (perte d'efficacité à l'évitement des prédateurs, accès à la nourriture etc.). De plus, Boyes et col. (2020) souligne l'absence de résultats significatifs concernant les effets négatifs de la lumière au stade « œuf » et au stade « nymphe » ou encore concernant la répulsion à la lumière. Des effets négatifs significatifs ont néanmoins été détectés dans de nombreux aspects de la vie du Papillon de nuit.

Les effets de l'éclairage nocturne sur les Papillons de nuit font l'objet de publications depuis, a minima, 1952 avec les travaux de Robinson sur les premiers pièges lumineux. Un grand nombre de publications ont ensuite été produites traitant des effets de la lumière artificielle sur leurs déplacements ou leurs cycles de vie. Boyes et col. (2020) ont réalisé une synthèse de ces études afin de définir les liens entre pollution lumineuse et déclin des populations de papillons de nuit. Dans cette publication, il y est notamment démontré que les papillons de nuit sont des bons indicateurs en ce qui concerne l'attractivité des lampes pour l'ensemble des insectes.

VIII.1 Attraction à la lumière

L'attraction à la lumière n'est pas sans conséquence pour ces espèces et les écosystèmes. Pour plusieurs espèces, cela a pour conséquence la mort des individus (capture facilitée pour les prédateurs, fatigue, brûlure par les lampes etc.). Le détournement des individus de leurs habitats naturels peut aussi avoir un impact sur les prédateurs fuyant la lumière (indisponibilité des proies) comme certains Murins.

Boyes et col. (2020) ont synthétisé les résultats de différentes études sur l'attractivité des différentes sources d'éclairages couramment utilisées en milieu urbain (Tableau 3).

Dans cette même publication, une méta-analyse a été réalisée à partir des résultats de 14 études. Il apparaît que, pour les insectes et notamment les papillons de nuit, les lampes couramment utilisées en éclairage urbain extérieur peuvent être ordonnées selon leur capacité d'attraction comme suivant :

1. LEDs blanches (froides [entre 2700 K et 3500 K] ou chaudes [entre 4000 K et 6500 K])
2. Lampes à vapeur de Sodium haute pression
3. Lampes fluocompactes
4. Lampes à vapeur de Mercure ou à Halogénure métallique

En Allemagne, Brehm et col. (2021) ont testé l'effet de LEDs blanches froides, UV (365 nm), bleues (450 nm), vertes (530 nm), et rouges (640 nm) sur différentes espèces de papillons de nuit en laboratoire. Les résultats sont que la majorité des espèces sont attirées par les lumières UV et bleues par rapport aux autres lampes.

Tableau 3. Etudes comparant le nombre de papillons de nuit et/ou d'autres insectes attiré selon les types de lampe couramment utilisés pour l'éclairage extérieur. Remarquez que certaines de ces études ont comparé des types de lampes qui ne seront pas présentés ici (car ils ne sont pas largement utilisés pour l'éclairage extérieur, comme les LEDs colorés) - Boyes et col. (2020) traduit et modifié

| Référence | Types de lampes comparés fréquemment utilisés en extérieur | Résultat de la comparaison de l'attractivité |
|---------------------------------|--|--|
| Ryddel (1992) | MV ; HPS ; LPS | MV > HPS > LPS=Non-éclairé |
| Blake et col. (1994) | MV ; LPS | MV > LPS |
| Eisenbeis et col. (2006) | MV ; HPS | MV > HPS |
| Huemer et col. (2010) | MV ; HPS ; LED blanches chaudes et froides | Tout insectes : MH > HPS > LED froide > LED chaude Papillons de nuit : MH > HPS > LED froide = LED chaude |
| Barghini and De Medeiros (2012) | MV ; HPS | MV>HPS |
| Somers-Yeates et col. (2013) | MH ; HPS | Noctuidae: MH>HPS Geometridae: MH = HPS |
| Soneira (2013) | MH ; LED | MH > LED |
| Pawson and Bader (2014) | HPS; LED (6500 K, 5000 K, 4000 K, 3500 K, 3000 K, 2700 K) | LED 4000 K > HPS LED 6500 K = 5000 K = 4000 K = 3500 K = 3000 K = 2700 K |
| Van Grunsven et col. (2014) | MV ; MH ; LPS ; LED | MV > MH = LPS = LED |
| Longcore et col. (2015) | CFL ; LED | CFL > LED |
| Poiani et col. (2015) | CFL ; LED | CFL > LED |
| Justice and Justice (2016) | CFL ; LED blanches chaudes et froides | CFL = LED froide = LED chaude |
| Wakefield et col. (2016) | CFL ; LED blanches chaudes et froides | CFL > LED froide = LED chaude |
| Pintérné and Pödör (2017) | MH ; HPS | MH > HPS |
| Wakefield et col. (2018) | MH ; LED ; HPS | MH > LED = HPS |
| Van Grunsven et col. (2019) | MV ; LED | MV > LED |

Légende : MV : Lampe à vapeur de Mercure ou « ballon fluo » ; HPS : Lampe à Sodium haute pression ; LPS : Lampe à Sodium basse pression ; MH : lampe à iodure métallique ; LED : Diode électroluminescente ; CFL : Lampe fluocompacte.

VIII.2 Reproduction

Boyes et col. (2020) ont synthétisé les résultats de différentes études testant l'effet de la lumière artificielle sur la reproduction de papillons de nuit. Le Tableau 4 reprend ces études.

Tableau 4. Etudes traitant des effets de la lumière artificielle nocturne sur la reproduction des papillons de nuit et leurs résultats

| Références | Famille où une perturbation a été constatée | Perturbation constatée | Type de lampe où une perturbation a été constatée | Eclairement minimum où une perturbation a été constatée |
|-----------------------------|---|---|---|---|
| van Geffen et col. (2015a) | Noctuidae (<i>Mamestra brassicae</i>) | Réduction de la qualité et de la quantité des phéromones sexuelles des femelles | LEDs vertes, rouges et blanche chaude (~3000 K) | 17±1 lx |
| Fatzinger (1973) | Pyralidae (<i>Dioryctria abietella</i>) | La production et la libération de phéromone sexuelle par les femelles, ainsi que la réactivité des mâles à la phéromone | Lampe à incandescence (non précisée) | 3 lx |
| Sower et col. (1970) | Noctuidae (<i>Trichoplusia ni</i>) | Réduction du nombre de femelles dispersant des phéromones | Lampe à incandescence (non précisée) | 0,3 lx (niveau de perturbation proportionnelle à l'intensité lumineuse jusqu'à 300 lx, éclairement max. testé) |
| Shorey (1966) | Noctuidae (<i>Trichoplusia ni</i>) | Réduction du nombre d'accouplement | Lampe à incandescence (non précisée) | 0,3 lx (niveau de perturbation proportionnelle à l'intensité lumineuse jusqu'à 300 lx, où il n'y a plus d'accouplement) |
| Kanno (1980) | Crambidae (<i>Chilo Suppressalis</i>) | Suppression de l'accouplement | Lampe à incandescence (non précisée) | 5 lx à 30°C, 65 lx à 25°C, 180 lx à 20°C, 600 lx à 15°C |
| van Geffen et col. (2015b) | Geometridae (<i>Operophtera brumata</i>) | Réduction du nombre d'accouplement et de l'efficacité des phéromones | LEDs blanches (~4000 K), rouges et vertes | 10 lx |
| Sambaraju & Philipps (2008) | Pyralidae (<i>Plodia interpunctella</i>) | Réduction du nombre d'œufs pondus | LEDs blanches, UV et vertes | ~8-40 lx |

En résumé, globalement, la reproduction des papillons de nuits est dépendante d'une phase d'obscurité. Plus l'éclairement est fort, plus la reproduction est impactée. Il est probable qu'en fonction des températures extérieures localement, la suppression puisse même être empêchée près des luminaires. Les longueurs d'ondes émises ne semblent pas être un facteur conditionnant l'impact de celles-ci sur la reproduction.

VIII.3 Croissance et diapause¹

Au Pays-Bas, van Geffen et col. (2014) ont exposé des chenilles de *Mamestra brassicae* (Noctuelle du Chou ; Noctuidae) à un éclairement de $7,0 \pm 0,6$ lx toute la nuit, avec des LEDs vertes, rouges et blanches. Ils ont comparé les résultats des chenilles éclairées aux différentes longueurs d'onde mais aussi à un témoin non-éclairé. Ils ont observé que la réponse à l'éclairage n'a pas été la même selon le sexe des chenilles. Ainsi, il n'y a pas eu de différences significatives entre les femelles. Cependant concernant les mâles, ceux soumis à un éclairage vert ou blanc atteignent une masse maximale inférieure aux mâles soumis à un éclairage rouge ou non-soumis à un éclairage. Ceux-ci passent également au stade « nymphe » plus tôt et les nymphes ont une masse plus faible. Van Geffen et col. (2014) soulignent que, indépendamment du sexe, le décalage entre l'émergence du premier adulte des chenilles éclairées avec des LEDs rouges ou non éclairées est apparue après 85 % des chenilles éclairées avec des LEDs blanches ou vertes. Cela pourrait avoir des conséquences significatives sur la survie de ces insectes.

Aux Etats-Unis, Grenys & Murphy (2019) ont également observé une réduction de la masse des chenilles de *Apamea sordens* (Noctuelle du chiendent ; Noctuidae) lorsque celles-ci sont éclairées. Ils ont fait l'expérience avec une lampe à vapeur haute pression installée pour éclairer à hauteur de 7-15 lx les chenilles.

En résumé, il apparaît que l'éclairage nocturne des chenilles de papillons de nuit réduit leur masse et le délai entre l'éclosion et le passage au stade « nymphe ». Cela qui pourrait réduire leurs chances de survie de façon importante.

VIII.4 Synthèse

Concernant l'attraction à la lumière, les papillons de nuits sont des bons indicateurs pour évaluer les effets sur l'ensemble des insectes. L'attraction est liée à l'intensité d'éclairement d'une part, et à la nature de la lumière d'autre part.

Concernant la reproduction, il apparaît que la lumière émise par des lampes à incandescence ainsi que par les LEDs peut réduire les phéromones produites par les femelles et inhiber l'accouplement, et ce même avec un éclairement de 0,3 lx.

Enfin, l'éclairage nocturne des chenilles de papillons de nuit réduit leur masse et le délai entre l'éclosion et le passage au stade « nymphe ». Cela pourrait réduire leurs chances de survie de façon importante.

¹ Arrêt temporaire de l'activité ou du développement chez les insectes, en hiver, ou à la saison sèche, ou en cas de carence alimentaire. (Larousse.fr, consulté le 02/06/2021)

VIII.5 Implications en termes de gestion

Il est préconisé d'éclairer au minimum les espaces naturels. Les lampes sur lesquelles intervenir en priorité peuvent être classées selon cet ordre :

1. Lampes à vapeur de Mercure ou à Halogénure métallique
2. Lampes fluocompactes
3. Lampes à vapeur de Sodium haute pression
4. LEDs blanches (froides [entre 2700 K et 3500 K] ou chaudes [entre 4000 K et 6500 K])
5. Lampes à vapeur de Sodium basse pression

Aucune publication scientifique n'a révélé l'intérêt d'utiliser des lampes de couleur pour réduire l'attraction des papillons de nuit (et donc des insectes de façon général). Cependant, les lampes avec des longueurs d'ondes dans le bleu et/ou émettant des UV attirent fortement les papillons de nuit et insectes et doivent être évitées.

IX. Insectes aquatiques

IX.1 Attraction à la lumière

Ephoron virgo est une espèce d'éphémère, qui comme d'autres animaux, détecte la polarisation de la lumière. Cette capacité lui permet d'identifier les surfaces en eau pour y pondre ses œufs. La ponte s'effectue sur des périodes de moins de 2 semaines suite à de grands rassemblements en essaims et à l'accouplement de millions d'individus. En Hongrie, il a cependant été observé que les essaims quittaient le cours d'eau pour se rassembler près de l'éclairage d'un pont et y mourraient. De plus, les femelles avaient pondu sur l'asphalte de la route. Suite à cette observation, Szaz et col (2015), ont révélé que la polarisation de la lumière des luminaires sur l'asphalte était similaire à celle de la surface de l'eau. Il apparaît que l'attraction d'*Ephoron virgo* serait donc liée à, d'une part, la polarisation de la lumière artificielle par l'asphalte et, d'autre part, directement par la lumière artificielle non-polarisée. Szaz et col (2015) proposent d'éclairer le moins possible les ponts, de réduire la hauteur de l'éclairage si l'éclairage est nécessaire et/ou d'augmenter la granulométrie de la route afin de réduire la polarisation. En considérant que de nombreuses espèces d'insectes aquatiques détectent la lumière polarisée et peuvent y être attirée, ces préconisations sont valables pour l'ensemble des insectes aquatiques.

Manfrin et col. (2017) ont étudié en Allemagne, entre autres, l'effet des lampes à vapeur de sodium haute pression sur l'émergence des insectes aquatiques et leur attraction à ces lampes. Il en résulte que le nombre d'insectes aquatiques émergeant et le nombre d'insectes volants d'origine aquatique est significativement supérieur à des habitats similaires proches non-éclairés.

Enfin en Suisse, Carannante et col. (2021) ont testé l'attraction des insectes aux lampes LEDs blanches à plusieurs distances d'un cours d'eau : 3, 10, 20, 40, 60 et 80 m. Globalement, le nombre de capture toutes espèces confondues décroît significativement avec la distance. Cette décroissance est plus importante à

partir de 10 m pour les Trichoptères, 40m pour les Ephemeropteres et 60 m pour les Dipteres. Carannante et col. (2021) preconise donc de positionner les eclaireage LEDs a plus de 40-60 m des cours d'eau.

IX.2 Synthèse

L'éclairage artificiel nocturne a un effet attractif important sur de nombreux insectes volants ayant une phase aquatique. Ceux-ci sont attirés par la lumière issue directement de la lampe mais aussi par celle polarisé par l'asphalte.

IX.3 Implications en termes de gestion

Il est recommandé d'éclairer le moins possible les ponts (extinction, abaissement des lampes, canalisation des flux etc.) et d'éloigner d'au moins 60 m les lampes des bords de cours d'eau. De plus, il est à privilégier un revêtement à forte granulométrie sur les ponts et près des cours d'eau pour réduire la polarisation de la lumière émise par les lampes.

Références

Général

- Grubisic, M.; Haim, A.; Bhusal, P.; Dominoni, D.M.; Gabriel, K.M.A.; Jechow, A.; Kupprat, F.; Lerner, A.; Marchant, P.; Riley, W.; Stebelova, K.; van Grunsven, R.H.A.; Zeman, M.; Zubidat, A.E.; Hölker, F. (2019). Light Pollution, Circadian Photoreception, and Melatonin in Vertebrates. *Sustainability*, 11, 6400.
- Verheijen, F.J. (1985). Photopollution: artificial light optic spatialcontrol systems fail to cope with incidents, causations, remedies. *Exp Biol* 44: 1–18.

Grands Mammifères

- Bliss-Ketchum, L.L., de Rivera, C.E., Turner, B.C., Weisbaum, D.M. (2016). The effect of artificial light on wildlife use of a passage structure, *Biological Conservation*, Volume 199, Pages 25-28.
- Ciach, M., Fröhlich, A. (2019). Ungulates in the city: light pollution and open habitats predict the probability of roe deer occurring in an urban environment. *Urban Ecosystem* 22, 513–523.
- Ditmer, M.A., Stoner, D.C., Francis, C.D., Barber, J.R., Forester, J.D., Choate, D.M., Ironside, K.E., Longshore, K.M., Hersey, K.R., Larsen, R.T., McMillan, B.R., Olson, D.D., Andreasen, A.M., Beckmann, J.P., Holton, P.B., Messmer, T.A. and Carter, N.H. (2021). Artificial nightlight alters the predator–prey dynamics of an apex carnivore. *Ecography*, 44: 149-161.

Petits mammifères hors chiroptères

- Bliss-Ketchum, L.L., de Rivera, C.E., Turner, B.C., Weisbaum, D.M. (2016). The effect of artificial light on wildlife use of a passage structure, *Biological Conservation*, Volume 199, Pages 25-28.
- Hoffmann, J., Schirmer, A. & Eccard, J.A. (2019). Light pollution affects space use and interaction of two small mammal species irrespective of personality. *BMC Ecol* 19, 26.
- Zhang, F.S., Wang, Y., Wu, K., Xu, W.Y., Wu, J., Liu, J.Y., Wang, X.Y., Shuai, L.Y. (2020). Effects of artificial light at night on foraging behavior and vigilance in a nocturnal rodent, *Science of The Total Environment*, Volume 724.

Chiroptères

- 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? *Glob Change Biol*, 21: 4333-4341.
- Azam, C., Le Viol, I., Julien, J.F., Bas, Y., Kerbiriou, C. (2016). Disentangling the relative effect of light pollution, impervious surfaces and intensive agriculture on bat activity with a national-scale monitoring program. *Landscape Ecol* 31, 2471–2483.
- Azam, C., Le Viol, I., Bas, Y., Zissis, G., Vernet, A., Julien, J.J., Kerbiriou, C. (2018). Evidence for distance and illuminance thresholds in the effects of artificial lighting on bat activity, *Landscape and Urban Planning*, Volume 175, Pages 123-135.
- Barré, K., Kerbiriou, C., Ing, R.K., Bas, Y., Azam, C., Le Viol, I., Spoelstra, K. (2021). Bats seek refuge in cluttered environment when exposed to white and red lights at night. *Mov Ecol* 9, 3.
- Bhardwaj, M., Soanes, K., Lahoz-Monfort, J.J., Lumsden, L.F., van der Ree, R. (2020). Artificial lighting reduces the effectiveness of wildlife-crossing structures for insectivorous bats, *Journal of Environmental Management*, Volume 262.
- Bolliger, J., Hennet, T., Wermelinger, B., Blum, S., Haller, J., Obrist, M.K. (2020a). Low impact of two LED colors on nocturnal insect abundance and bat activity in a peri-urban environment. *J Insect Conserv* 24, 625–635.
- Boldogh, S., Dobrosi, D., and Samu P. (2007). "The effects of the illumination of buildings on house-dwelling bats and its

conservation consequences," *Acta Chiropterologica* 9(2), 527-534.

- Downs, N.C., Beaton, V., Guest, J., Polanski, J., Robinson, S.L., Racey, P.A. (2003). The effects of illuminating the roost entrance on the emergence behaviour of *Pipistrellus pygmaeus*, *Biological Conservation*, Volume 111, Issue 2, Pages 247-252.
- Haddock, J.K., Threlfall, C.G., Law, B., Hochuli, D.F. (2019). Light pollution at the urban forest edge negatively impacts insectivorous bats, *Biological Conservation*, Volume 236, 2019, Pages 17-28.
- Janine Bolliger, J., Tom Hennet, T., Wermelinger, B., Bösch, R., Pazur, P., Blum, S., Haller, J., Obrist, M.K. (2020b). Effects of traffic-regulated street lighting on nocturnal insect abundance and bat activity, *Basic and Applied Ecology*, Volume 47, 2020b, Pages 44-56.
- Lacoeuilhe, A., Machon, N., Julien, J.F., Le Bocq, A., Kerbiriou, C. (2014) The Influence of Low Intensities of Light Pollution on Bat Communities in a Semi-Natural Context. *PLoS ONE* 9(10): e103042.
- Lewanzik, D., Sundaramurthy, A.K., Goerlitz, H.R. (2019) Insectivorous bats integrate social information about species identity, conspecific activity and prey abundance to estimate cost–benefit ratio of interactions. *J Anim Ecol.*; 88: 1462– 1473.
- Packman, C., Zeale, M., Harris, S. & Jones, G. (2015). Management of bats in churches – a pilot. *English Heritage Research Project*: 6199
- Pauwels, J., Le Viol, I., Azam, C., Valet, N., Julien, J.-F., Bas, Y., Lemarchand, C., Sanchez de Miguel, A., Kerbiriou, C. (2019). Accounting for artificial light impact on bat activity for a biodiversity-friendly urban planning, *Landscape and Urban Planning*, Volume 183, 2019, Pages 12-25.
- Roeleke, M., Johannsen, L., Voigt, C.C. (2018). How Bats Escape the Competitive Exclusion Principle—Seasonal Shift From Intraspecific to Interspecific Competition Drives Space Use in a Bat Ensemble. *Front. Ecol. Evol.* 6:101.
- 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. *Proc. R. Soc. B* 284: 20170075.
- Spoelstra, K., Ramakers, J.J.C., van Dis, N.E., Visser, M.E. (2018). No effect of artificial light of different colors on commuting Daubenton's bats (*Myotis daubentonii*) in a choice experiment. *Journal of Experimental Zoology*, 329: 506–510.
- Stone, E.L., Jones, G., Harris, S. (2009). Street Lighting Disturbs Commuting Bats, *Current Biology*, Volume 19, Issue 13, Pages 1123-1127.
- Straka, T.M, Wolf, M., Gras, P., Buchholz, S., Voigt, C.C. (2019). Tree Cover Mediates the Effect of Artificial Light on Urban Bats. *Front. Ecol. Evol.* 7:91.
- Straka, T.M., Greif, S., Schultz, S., Goerlitz, H.R., Voigt, C.C. (2020). The effect of cave illumination on bats, *Global Ecology and Conservation*, Volume 21.
- Voigt, C.C., Roeleke, M., Marggraf, L., Petersons, G., Voigt-Heucke S.L. (2017). Migratory bats respond to artificial green light with positive phototaxis. *PLoS ONE* 12(5): e0177748.
- Voigt, C.C., Rehnig, K., Lindecke, O., Petersons, G. (2018). Migratory bats are attracted by red light but not by warm-white light: Implications for the protection of nocturnal migrants. *Ecol Evol.*; 8: 9353– 9361.
- Voigt, C.C., Scholl, J.M., Bauer, J., Telge, T., Yoel, Y., Kramer-Schadt, S., Gras, P. (2020). Movement responses of common noctule bats to the illuminated urban landscape. *Landscape Ecol* 35, 189–201.
- 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 Change Biol.*; 24: 5909–5918.

Amphibiens

- Komine, H., Koike, S., Schwarzkopf, L. (2020). Impacts of artificial light on food intake in invasive toads. *Sci Rep* 10, 6527.
- Touzot, M., Teulier, L., Lengagne T., Secondi J., Théry M., Libourel P.A., Guillard L., Mondy N. (2019). Artificial light at night disturbs the activity and energy allocation of the common toad during the breeding period. *Conserv Physiol* 7(1): coz002
- Touzot, M., Lengagne, T., Secondi, J., Desouhant, E., Théry, M., Dumet, A., Duchamp, C., Mondy, N. (2020). Artificial light at night alters the sexual behaviour and fertilisation success of the common toad, *Environmental Pollution*, Volume 259.
- van Grunsven, R.H., Creemers, R., Joosten, K., Donners, M., Veenendaal, E. (2017). Behaviour of migrating toads under artificial lights differs from other phases of their life cycle, *Amphibia-Reptilia*, 38(1), 49-55

Poissons

- Brüning, A., Hölker, F., Wolter, C. (2010). Artificial light at night: implications for early life stages development in four temperate freshwater fish species. *Aquatic Sciences* 73: 143-152.
- Keep, J.K., Watson, J.R., Cramp, R.L., Jones, M.J., Gordos, M.A., Ward, P.J., Franklin, C.E. (2021). Low light intensities increase avoidance behaviour of diurnal fish species: implications for use of road culverts by fish. *J Fish Biol.*, 98 : 634–642.
- Miner, K.A., Huertas, M., Aspbury, A.S., Gabor, C.R. (2021). Artificial Light at Night Alters the Physiology and Behavior of Western Mosquitofish (*Gambusia affinis*). *Front. Ecol. Evol.* 9:617063.
- Nelson, T.R., Michel, C.J., Gary, M.P., Lehman, B.M., Demetras, N.J., Hammen, J.J., Horn, M.J. (2021). Effects of Artificial Lighting at Night on Predator Density and Salmonid Predation. *Trans Am Fish Soc*, 150: 147-159.
- Pulgar, J., Zeballos, D., Vargas, J., Aldana, M., Manriquez, P.H., Manriquez, K., Quijón, P.A., Widdicombe, S., Anguita, C., Quintanilla, D., Duarte, C. (2019). Endogenous cycles, activity patterns and energy expenditure of an intertidal fish is modified by artificial light pollution at night (ALAN), *Environmental Pollution*, Volume 244.

Oiseaux

- Aulsebrook, A.E.; Johnsson, R.D.; Lesku, J.A. (2021). Light, Sleep and Performance in Diurnal Birds. *Clocks&Sleep*, 3, 115–131.
- Cooper, J., Ryan, P.G. (1994). Management Plan for the Gough Island Wildlife Reserve. Government of Tristan da Cunha, Edinburgh, Tristan da Cunha.
- Dominoni, D.M., Quetting, M., Partecke, J. (2013). Long-Term Effects of Chronic Light Pollution on Seasonal Functions of European Blackbirds (*Turdus merula*). *PLoS ONE* 8(12): e85069.
- Dominoni, D.M., Borniger, J.C., Nelson, R.J. (2016). Light at night, clocks and health: from humans to wild organisms. *Biology Letters* 12:20160015.
- Dominoni, D.M., Jensen, J.K., de Jong, M., Visser, M.E., Spoelstra, K. (2020). Artificial light at night, in interaction with spring temperature, modulates timing of reproduction in a passerine bird. *Ecological Applications* 30(3):e02062.
- Doppler, M.S., Blackwell, B.F., DeVault, T.L., Fernandez-Juricic, E. (2015). Cowbird responses to aircraft with lights tuned to their eyes: Implications for bird–aircraft collisions. *Condor* 117:165–177.
- Glass, J.P., Ryan, P.G. (2013). Reduced seabird night strikes and mortality in the Tristan rock lobster fishery. *African Journal of Marine Science* 35:589–592.
- Kernbach, M.E., Newhouse, D.J., Miller, J.M., Hall, R.J., Gibbons, J., Oberstaller, J., Selechnik, D., Jiang, R.H.Y., Unnasch, T.R., Balakrishnan, C.N., Martin, L.B. (2019). Light pollution increases West Nile virus competence of a ubiquitous

passerine reservoir species. *Proc. R. Soc. B*. 2862019105120191051

- Miles, W., Money, S., Luxmoore, R., Furness, R.W. (2010). Effects of artificial lights and moonlight on petrels at St Kilda. *Bird Study* 57: 244–251.
- Poot, H., Ens, B.J., de Vries, H., Donners, M.A.H., Wernand, M.R., Marquenie, J.M. (2008). Green light for nocturnally migrating birds. *Ecology and Society* 13(2): 47.
- Reed, J.R., Sincock, J.L., Hailman, J.P. (1985). Light attraction in endangered Procellariiform birds: reduction by shielding upward radiation. *Auk* 102:377–383.
- Reed, J.R. (1986). Seabird Vision: spectral sensitivity and light attraction behavior. PhD dissertation. University of Wisconsin, Madison.
- Rodriguez, A., Burgan, G., Dann, P., Jessop, R., Negro, J.J., Chiaradia, A. (2014). Fatal attraction of short-tailed shearwaters to artificial lights. *PLOS ONE* 9 (e110114)
- Rodríguez, A., Holmes, N.D., Ryan, P.G., Wilson, K.-J., Faulquier, L., Murillo, Y., Raine, A.F., Penniman, J.F., Neves, V., Rodríguez, B., Negro, J.J., Chiaradia, A., Dann, P., Anderson, T., Metzger, B., Shirai, M., Deppe, L., Wheeler, J., Hodum, P., Gouveia, C., Carmo, V., Carreira, G.P., Delgado-Alburqueque, L., Guerra-Correa, C., Couzi, F.-X., Travers, M. and Corre, M.L. (2017). Seabird mortality induced by land-based artificial lights. *Conservation Biology*, 31: 986-1001.
- Rodríguez, A., Orozco-Valor, P.M., Sarasola, J.H. (2021). Artificial light at night as a driver of urban colonization by an avian predator. *Landscape Ecol* 36, 17–27.
- Sepp, T., Webb, E., Simpson, R.K., Giraudeau, M., McGraw, K.J., Hutton, P. (2021). Light at night reduces digestive efficiency of developing birds: an experiment with King quail. *Sci Nat* 108, 4.
- Sierro, A., Erhardt, A. (2019). Light pollution hampers recolonization of revitalised European Nightjar habitats in the Valais (Swiss Alps). *J Ornithol* 160, 749–761.
- Smith, R.A., Gagné, M., Fraser, K.C. (2021). Pre-migration artificial light at night advances the spring migration timing of a trans-hemispheric migratory songbird, *Environmental Pollution*, Volume 269, 116136.
- The Associated Press. 2010. In Hawaii, birds' Friday night flights turn out the lights on prep games. *New York Times* 23 October. Available from <http://www.nytimes.com/2010/10/24/sports/24birds.html> (accessed October 2016).
- van Doren, B.M., Horton, K.G., Dokter, A.M., Klinck, H., Elbin, S.B., Farnsworth, A. (2017). Intense urban lights alter bird migration *Proceedings of the National Academy of Sciences* Oct 2017, 114 (42) 11175-11180
- van Hasselt, S.J., Hut, R.A., Allocca, G., Vyssotski, A.L., Piersma, T., Rattenborg, N.C., Meerlo, P. (2020). Cloud cover amplifies the sleep-suppressing effect of artificial light at night in geese, *Environmental Pollution*
- Watson, M.J., Wilson, D.R., Mennill, D.J. (2020). Anthropogenic light is associated with increased vocal activity by nocturnally migrating birds, " *The Condor* 118(2), 338-344

Flore

- Bennie, J., Davies, T.W., Cruse, D., Inger, R., Gaston, K.J. (2015). Cascading effects of artificial light at night: resource-mediated control of herbivores in a grassland ecosystem. *Phil. Trans. R. Soc. B* 370: 20140131.
- Bennie, J., Davies, T.W., Cruse, D., Gaston, K.J. (2016). Ecological effects of artificial light at night on wild plants. *J Ecol*, 104: 611-620.
- Bennie, J., Davies, T.W., Cruse, D., Inger, R., Gaston, K.J. (2018). Artificial light at night causes top-down and bottom-up trophic effects on invertebrate populations. *J Appl Ecol.*; 55: 2698–2706.
- Bennie, J., Davies, T.W., Cruse, D., Bell, F., Gaston, K.J. (2018) Artificial light at night alters grassland vegetation species composition and phenology. *J Appl Ecol.*; 55: 442–450.

- Blanchard, M.G., Runkle, E.S. (2010). Intermittent light from a rotating high-pressure sodium lamp promotes flowering of long-day plants, *Hort. Sci.*, vol. 45, pp. 236–241.
- Boom, M.P., Spoelstra, K., Biere, A., Knop, E., Visser, M.E. (2020). Pollination and fruit infestation under artificial light at night: light colour matters. *Sci Rep* 10, 18389.
- Craig, D.S., Runkle, E.S. (2016). An intermediate phytochrome photoequilibrium from night-interruption lighting optimally promotes flowering of several long-day plants, *Environ. Exp. Bot.*, vol. 121, pp. 132–138.
- Ffrench-Constant, R.H., Somers-Yeates, R., Bennie, J., Economou, T., Hodgson, D., Spalding, A., McGregor, P.K. (2016). Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom. *Proc. R. Soc. B* 283: 20160813.
- Grenis, K., Murphy, S.M. (2019). Direct and indirect effects of light pollution on the performance of an herbivorous insect. *Insect Science*, 26: 770–776.
- Kim, Y.J., Lee, H.J., Kim, K.S. (2013). Carbohydrate changes in *Cymbidium* 'Red Fire' in response to night interruption, *Sci. Hort.*, vol. 162, pp. 82–89.
- Kim, Y.J., Yu D.J., Rho, H., Runkle, E.S., Lee, H.J., Kim, K.S. (2015). Photosynthetic changes in *Cymbidium* orchids grown under different intensities of night interruption lighting, *Scientia Horticulturae*, Volume 186, Pages 124–128.
- Macgregor, C.J., Pocock, M.J.O., Fox, R., Evans, D.M. (2015). Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of light pollution: a review. *Ecol Entomol*, 40: 187–198.
- McGregor, C.J., Pocock, M.J.O., Fox, R., Evans, D.M. (2019). Effects of street lighting technologies on the success and quality of pollination in a nocturnally pollinated plant. *Ecosphere*
- Martinell, M.C., Dötterl, S., Blanché, C., Rovira, A., Massó, S., Bosch, M. (2010). Nocturnal pollination of the endemic *Silene sennesii* (Caryophyllaceae): an endangered mutualism? *Plant Ecol. Evol.*, vol. 143, pp. 203–208.
- National Research Council. 2007. Status of Pollinators in North America. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11761>.
- Queval, G., Issakidis-Bourguet, E., Hoerberichts, F.A., Vandorpe, M., Gakiere, B., Vanacker, H., Miginiac-Maslow, M., van Breusegem, F., Noctor, G. (2007). Conditional oxidative stress responses in the *Arabidopsis* photorespiratory mutant *cat2* demonstrate that redox state is a key modulator of daylength-dependent gene expression, and define photoperiod as a crucial factor in the regulation of H₂O₂-induced cell death, *Plant J.*, vol. 52, pp. 640–657
- Raven, J.A., Cockell, C.S. (2006). Influence on photosynthesis of starlight, moonlight, planet light and light pollution (reflections on photosynthetically active radiation in the universe), *Astrobiology*, vol. 6, pp. 668–676.
- Schroer, S., Haffner, E., Holker, F. (2019). Impact of artificial illumination on the development of a leafmining moth in urban trees. *International Journal of Sustainable Lighting IJSL*, pp. 1–10
- Singhal, R.K., Kumar, M., Bose, B. (2019). Eco-physiological Responses of Artificial Night Light Pollution in Plants. *Russ J Plant Physiol* 66, 190–202.
- Škvareninová, J., Tuhárska, M., Škvarenina, J., Babálová, D., Slobodníková, L., Slobodník, B., Středová, H., Mindaš, J. (2017). Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment. *Moravian Geographical Reports*, vol.25, no.4
- Vollsnes, A.V., Eriksen, A.B., Otterholt, E., Kvaal, K., Oxaal, U., Futsaether, C.M., (2009). Visible foliar injury and infrared imaging show that daylength affects short-term recovery after ozone stress in *Trifolium subterraneum*, *J. Exp. Bot.*, vol. 60, pp. 3677–3686.
- Blake, D., Hutson, A.M., Racey, P.A., Rydell, J., Speakman, J.R. (1994). Use of lamplit roads by foraging bats in southern England. *Journal of Zoology*, 234, 453–462.
- Boyes, D.H., Evans, D.M., Fox, R., Parsons, M.S., Pocock, M.J.O. (2021). Is light pollution driving moth population declines? A review of causal mechanisms across the life cycle. *Insect Conserv Divers*, 14: 167–187.
- Davies, T.W., Bennie, J., Gaston, K.J. (2012). Street lighting changes the composition of invertebrate communities. *Biol. Lett.* 8:764–767.
- Eisenbeis, G. (2006). Artificial night lighting and insects: attraction of insects to streetlamps in a rural setting in Germany. *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting* (ed. by C. Rich and T. Longcore), pp. p. 191–198. Island Press, Washington, DC.
- Fatzinger, C.W. (1973). Circadian Rhythmicity of Sex Pheromone Release by *Dioryctria abietella* (Lepidoptera: Pyralidae (Phycitinae)) and the Effect of a Diel Light Cycle on Its Precopulatory Behavior, *Annals of the Entomological Society of America*, Volume 66, Issue 5, Pages 1147–1153.
- Grenis, K., Murphy, S.M. (2019). Direct and indirect effects of light pollution on the performance of an herbivorous insect. *Insect Science*, 26, 770–776.
- Huemer, P., Kührtreiber, H., Tarmann, G.M. (2010). Anlockwirkung moderner Leuchtmittel auf nachtaktive Insekten – Ergebnisse einer Feldstudie in Tirol (Österreich).
- Jones, T.M., Durrant, J., Michaelides, E.B., Green, M.P. (2015) Melatonin: a possible link between the presence of artificial light at night and reductions in biological fitness, *Phil. Trans. R. Soc. B*, 2015, vol. 370: 20140122.
- Justice, M.J., Justice, T.C. (2016). Attraction of insects to incandescent, compact fluorescent, halogen, and LED lamps in a light trap: implications for light pollution and urban ecologies. *Entomological News*, 125, 315–327.
- Kanno, H. (1980). Mating behavior of the rice stem borer moth, *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Pyralidae): IV. Threshold-light intensity for mating initiation under various temperatures. *Applied Entomology and Zoology*, 15, 372–377.
- Longcore, T., Aldern, H.L., Eggers, J.F., Flores, S., Franco, L., Hirshfield-Yamanishi, E., Petrinec, L.N., Yan, W.A., Barroso, A.M. (2015). Tuning the white light spectrum of light emitting diode lamps to reduce attraction of nocturnal arthropods. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370, 20140125.
- Macgregor, C.J., Pocock, M.J., Fox, R., Evans, D.M. (2015) Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of light pollution: a review, *Ecol. Entomol.*, 2015, vol. 3, pp. 187–198.
- Manfrin, A., Singer, G., Larsen, S., Weiß, N., van Grunsven, R.H.A., Weiß, N.S., Wohlfahrt, S., Monaghan, M.T., Hölker F. (2017). Artificial Light at Night Affects Organism Flux across Ecosystem Boundaries and Drives Community Structure in the Recipient Ecosystem. *Front. Environ. Sci.* 5:61.
- Pawson, S.M., Bader, M.F. (2014). LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature. *Ecological Applications*, 24, 1561–1568.
- Poiani, S., Dietrich, C., Barroso, A., Costa-Leonardo, A.M. (2015). Effects of residential energy-saving lamps on the attraction of nocturnal insects. *Lighting Research & Technology*, 47, 338–348.
- Robinson, H.S. (1952). On the behaviour of night-flying insects in the neighbourhood of a bright source of light. *Proceedings of the Royal Entomological Society of London. Series A, General Entomology*, 27(1-3), 13–21.
- Rydell, J. (1992). Exploitation of insects around streetlamps by bats in Sweden. *Functional Ecology*, 6, 744–750.
- Sambaraju, K.R., Phillips, T.W. (2008). Responses of Adult *Plodia interpunctella* (Hübner) (Lepidoptera: Pyralidae) to Light and Combinations of Attractants and Light. *Journal of Insect Behavior*, 21(5), 422–439. doi:10.1007/s10905-008-9140-5
- Schroer, S., Haffner, E., Holker, F. (2019). Impact of artificial illumination on the development of a leafmining moth in

Insectes

Barghini, A., de Medeiros, B.A. (2012). UV radiation as an attractor for insects. *Leukos*, 9, 47–56.

- urban trees. *International Journal of Sustainable Lighting IJSL*, pp. 1-10.
- Shorey, H.H. (1966). The Biology of *Trichoplusia ni* (Lepidoptera: Noctuidae). IV. Environmental Control of Mating, *Annals of the Entomological Society of America*, Volume 59, Issue 3, Pages 502–506.
- Somers-Yeates, R., Hodgson, D., McGregor, P.K., Spalding, A., French-Constant, R. (2013). Shedding light on moths: shorterwavelengths attract noctuids more than geometrids. *Biology Letters*, 9, 20130376.
- Soneira, M. (2013) Auswirkungen auf die Insekten-Fauna durch die Umrüstung von Kugelleuchten auf LED-Beleuchtungen. *Wien Leuchtet*.
- Sower, L.L., Shorey, H.H., Gaston, L.K. (1970). Sex pheromones of noctuid moths. XXI. Light: dark cycle regulation and light inhibition of sex pheromone release by females of *Trichoplusia ni*. *Ann Entomol Soc Am.*;63(4):1090-2. doi: 10.1093/aesa/63.4.1090. PMID: 5449399.
- Szaz, D., Horvath, G., Barta, A., Robertson, B.A., Farkas, A., Egri, A., Tarjanyi, N., Racz, G., Kriska, G. (2015). Lamp-Lit Bridges as Dual Light-Traps for the Night-Swarming Mayfly, *Ephoron virgo*: Interaction of Polarized and Unpolarized Light Pollution. *PLoS ONE* 10(3): e0121194.
- van Geffen, K.G., van Grunsven, R.H.A., van Ruijven, J., Berendse, F., Veenendaal, E.M. (2014). Artificial light at night causes diapause inhibition and sex-specific life history changes in a moth. *Ecology and Evolution*, 4, 2082–2089.
- van Geffen, K.G., Groot, A.T., van Grunsven, R.H.A., Donners, M., Berendse, F., Veenendaal, E.M. (2015a). Artificial night lighting disrupts sex pheromone in a noctuid moth. *Ecological Entomology*, 40, 401–408.
- van Geffen, K.G., van Eck, E., de Boer, R.A., van Grunsven, R.H.A., Salis, L., Berendse, F., Veenendaal, E.M. (2015b). Artificial light at night inhibits mating in a Geometrid moth. *Insect Conservation and Diversity*, 8, 282–287.
- van Grunsven, R.H.A., Donners, M., Boekee, K., Tichelaar, I., van Geffen, K.G., Groenendijk, D., Berendse, F., Veenendaal, E.M. (2014). Spectral composition of light sources and insect phototaxis, with an evaluation of existing spectral response models. *Journal of Insect Conservation*, 18, 225–231.
- van Grunsven, R.H.A., Becker, J., Peter, S., Heller, S., Hölker, F. (2019). Long-term comparison of attraction of flying insects to streetlights after the transition from traditional light sources to light-emitting diodes in urban and peri-urban settings. *Sustainability*, 11, 6198.
- Wakefield, A., Broyles, M., Stone, E.L., Jones, G. & Harris, S. (2016). Experimentally comparing the attractiveness of domestic lights to insects: do LED s attract fewer insects than conventional light types? *Ecology and Evolution*, 6, 8028–8036.