



HAL
open science

Effet fragmentant de la lumière artificielle - quels impacts sur la mobilité des espèces et comment peuvent-ils être pris en compte dans les réseaux écologiques ?

R. Sordello, S. Vanpeene, C. Azam, C. Kerbirou, I. Le Viol, T. Le Tallec

► To cite this version:

R. Sordello, S. Vanpeene, C. Azam, C. Kerbirou, I. Le Viol, et al.. Effet fragmentant de la lumière artificielle - quels impacts sur la mobilité des espèces et comment peuvent-ils être pris en compte dans les réseaux écologiques ?. [Rapport de recherche] irstea. 2014, pp.31. hal-02605886

HAL Id: hal-02605886

<https://hal.inrae.fr/hal-02605886>

Submitted on 16 May 2020

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

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

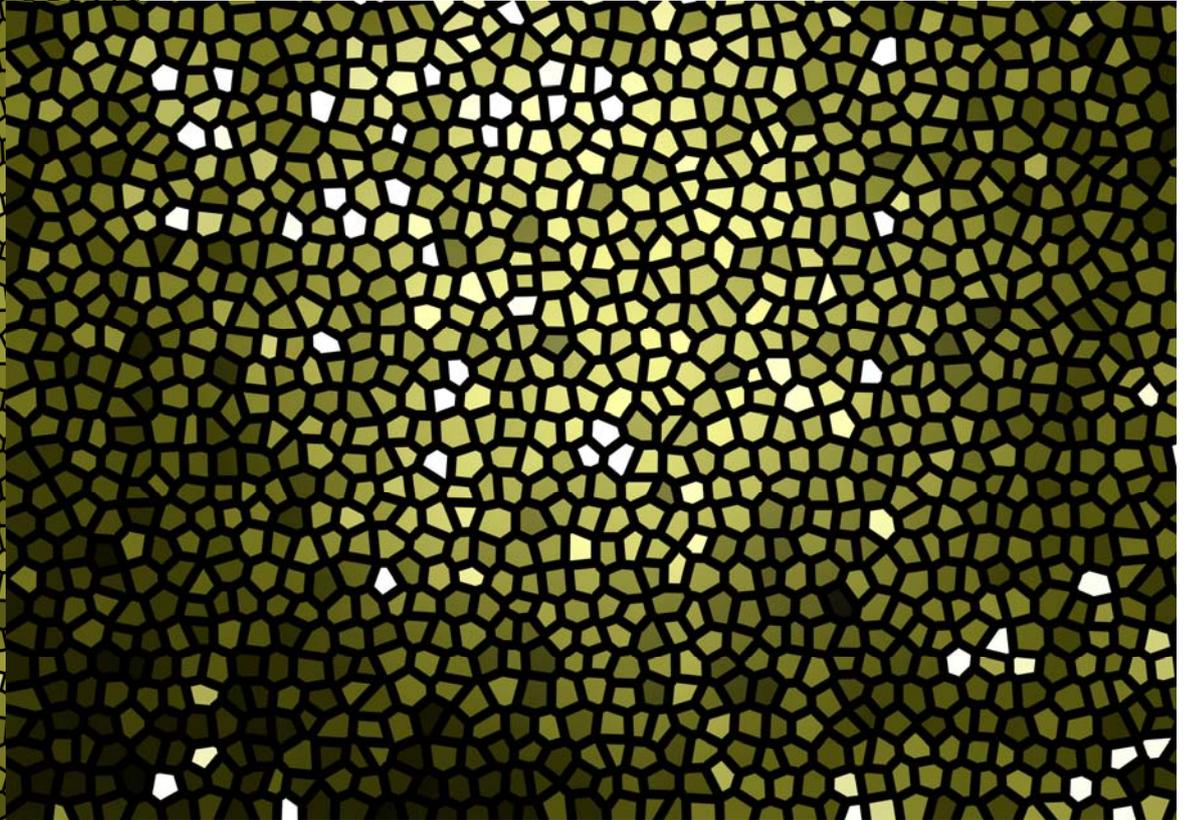


**Muséum
national
d'histoire
naturelle**

Direction de la Recherche, de l'Expertise et de la Valorisation
Direction Déléguée au Développement Durable, à la Conservation de la Nature et à l'Expertise

Service du Patrimoine Naturel

Romain Sordello, Sylvie Vanpeene, Clémentine Azam,
Christian Kerbirou, Isabelle Le Viol & Thomas Le Tallec



Effet fragmentant de la lumière artificielle

*Quels impacts sur la mobilité des
espèces et comment peuvent-ils être
pris en compte dans les réseaux
écologiques ?*



Rapport produit dans le cadre de la mission du SPN-MNHN au sein du Centre de ressources Trame verte et bleue (CONVENTION MNHN/MEDDE)

Premier auteur et coordination :

Romain Sordello, Chef de projet Trame verte et bleue (TVB), MNHN-SPN, Centre de ressources TVB

Contributeurs et relecteurs :

Sylvie Vanpeene, Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea), Centre de ressources TVB

Clémentine Azam, Doctorante au Centre des Sciences de la Conservation (CESCO), MNHN

Christian Kerbiriou, Maître de conférence (CESCO), MNHN

Isabelle Le Viol, Maître de conférence (CESCO), MNHN

Thomas Le Tallec, Doctorant au laboratoire « Mécanismes Adaptatifs et Evolution », UMR 7179, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), MNHN

Citation recommandée : SORDELLO R., VANPEENE S., AZAM C., KERBIRIOU C., LE VIOL I. & LE TALLEC T. (2014). *Effet fragmentant de la lumière artificielle. Quels impacts sur la mobilité des espèces et comment peuvent-ils être pris en compte dans les réseaux écologiques ?*. Muséum national d'Histoire naturelle, Centre de ressources Trame verte et bleue. 31 pages.

Le Service du Patrimoine Naturel (SPN)

Inventorier - Gérer - Analyser - Diffuser

Au sein de la direction de la recherche, de l'expertise et de la valorisation (DIREV), le Service du Patrimoine Naturel développe la mission d'expertise confiée au Muséum national d'Histoire naturelle pour la connaissance et la conservation de la nature. Il a vocation à couvrir l'ensemble de la thématique biodiversité (faune/flore/habitat) et géodiversité au niveau français (terrestre, marine, métropolitaine et ultra-marine). Il est chargé de la mutualisation et de l'optimisation de la collecte, de la synthèse et la diffusion d'informations sur le patrimoine naturel.

Placé à l'interface entre la recherche scientifique et les décideurs, il travaille de façon partenariale avec l'ensemble des acteurs de la biodiversité afin de pouvoir répondre à sa mission de coordination scientifique de l'Inventaire national du Patrimoine naturel (code de l'environnement : L411-5).

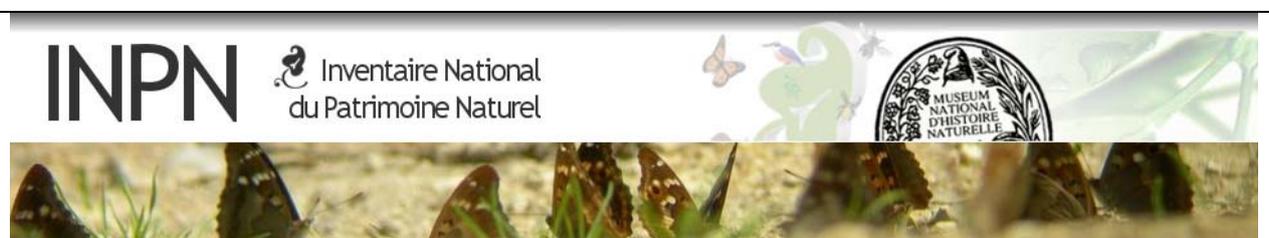
Un objectif : contribuer à la conservation de la Nature en mettant les meilleures connaissances à disposition et en développant l'expertise.

En savoir plus : <http://www.mnhn.fr/spn/>

Directeur : Jean-Philippe SIBLET

Adjoint au directeur en charge des programmes de connaissance : Laurent PONCET

Adjoint au directeur en charge des programmes de conservation : Julien TOUROULT



Porté par le SPN, cet inventaire est l'aboutissement d'une démarche qui associe scientifiques, collectivités territoriales, naturalistes et associations de protection de la nature en vue d'établir une synthèse sur le patrimoine naturel en France. Les données fournies par les partenaires sont organisées, gérées, validées et diffusées par le MNHN. Ce système est un dispositif clé du SINP et de l'Observatoire National de la Biodiversité.

Afin de gérer cette importante source d'informations, le Muséum a construit une base de données permettant d'unifier les données à l'aide de référentiels taxonomiques, géographiques et administratifs. Il est ainsi possible d'accéder à des listes d'espèces par commune, par espace protégé ou par maille de 10x10 km. Grâce à ces systèmes de référence, il est possible de produire des synthèses quelle que soit la source d'information.

Ce système d'information permet de mutualiser au niveau national ce qui était jusqu'à présent éparpillé à la fois en métropole comme en outre-mer et aussi bien pour la partie terrestre que pour la partie marine. C'est une contribution majeure pour la connaissance, l'expertise et l'élaboration de stratégies de conservation efficaces du patrimoine naturel.

En savoir plus : <http://inpn.mnhn.fr>

SOMMAIRE

I. La lumière artificielle comme source de fragmentation : point sur la connaissance scientifique	6
I.1. Description de la problématique	6
I.2. Cycle biologique contraint et mobilité modifiée	6
I.3. Mortalité directe par collision.....	9
I.4. Isolement du à l'infranchissabilité de la lumière pour certaines espèces	9
I.5. Autres effets	11
I.6. Prise de recul sur la connaissance	13
I.7. Possibilité pour plusieurs espèces de décrire un état initial	13
II. Pistes et réflexions pour la prise en compte de la lumière artificielle dans une démarche de trame verte et bleue	15
II.1. L'étape d'identification des éléments de trame (corridors/réservoirs).....	15
II.2. Lors de l'identification de points de conflits.....	20
II.3. A travers le plan d'action	20
II.4. Recul sur les trois approches présentées	22
III. Conclusion	25
IV. Bibliographie et iconographie.....	26
IV.1. Publications citées.....	26
IV.2. Références juridiques.....	30
IV.3. Crédits et sources iconographiques.....	31

Pour la première fois dans les politiques de conservation, la **Trame verte et bleue** (TVB) intègre la **notion d'échelle**. Ce projet initié en 2007 lors du Grenelle de l'environnement dépasse en effet l'approche historique de la protection de la nature, en prenant en compte le caractère dynamique de la biodiversité : sa mobilité, son hétérogénéité dans l'espace, la pluralité des assemblages du vivant (gène, population, métapopulation, aire de répartition, ...).

La première échelle ayant motivé l'apparition du projet TVB est ainsi l'échelle spatiale, avec par ailleurs une considération essentiellement portée vers les sources physiques de fragmentation.

Peu à peu, une prise de conscience s'effectue quant à l'existence de la dimension « **temps** » (cyclique comme linéaire) et à la potentialité de sources dites « immatérielles » de fragmentation comme la lumière. Le phénomène du temps cyclique, et par là-même **l'alternance de jour et de nuit** constatée à la surface de la Terre depuis des milliards d'années, a en effet constitué un paramètre environnemental totalement structurant au cours de l'Evolution (Holker, 2010b). Or, cette alternance est remise en cause par l'ajout de lumière artificielle du fait de nos activités humaines. Sur un plan scientifique et opérationnel il est alors pertinent de s'interroger sur les conséquences de type « fragmentation » que pourrait induire cet ajout de lumière artificielle la nuit. Cette question est d'autant plus légitime que 30 % des vertébrés et 60 % des invertébrés sont nocturnes (Holker, 2010b). Par ailleurs, beaucoup des déplacements d'individus ont lieu la nuit, y compris chez des espèces qualifiées globalement de diurnes (cas de la migration des oiseaux par exemple). L'impact fragmentant de la lumière est donc potentiellement une menace majeure pour la biodiversité et il est crucial de ne pas circonscrire les enjeux de la pollution lumineuse aux seuls aspects de consommations d'énergie (Holker, 2010a).

Les effets de l'ajout de lumière artificielle à un moment où il n'y a pas ou très peu de lumière (la nuit), engendrent des impacts directs et indirects sur le vivant désormais **prouvés et documentés** sur le plan biologique et physiologique (Rich & Longcore, 2006). Le Service du patrimoine naturel (Siblet, 2008) a produit un rapport de synthèse de ces différents effets par groupes biologiques.

La connaissance quant au pouvoir fragmentant de la lumière en revanche est plus faible mais surtout elle est plus dispersée. En 2013, le MNHN-SPN, au titre du **Centre de ressources TVB** (CDR TVB), a présenté un premier état des lieux, de manière à commencer à rassembler la connaissance sur ce sujet, assorti de pistes de réflexion, lors de la journée du CDR TVB sur « TVB et Pollution lumineuse » (Sordello, 2013a).

Ce rapport s'inscrit dans la continuité de cette conférence. Fruit d'un travail exploratoire, il propose ainsi d'aborder la question en deux parties :

I - Une première partie fait un état des lieux des effets de la lumière artificielle sur la mobilité. L'alimentation de cette partie a bénéficié de la base de données du site NuitFrance¹, qui centralise des références relatives à la biodiversité nocturne, la nuit et ses pollutions en offrant la possibilité de les classer par types, thèmes ou encore groupes biologiques (au 25/11/2014, cette base de données comptabilise 1015 références). L'objectif de cette première partie n'est pas d'exposer exhaustivement toutes les publications existantes mais de savoir si oui ou non la lumière artificielle peut être considérée sous l'angle de la fragmentation de l'espace, en s'appuyant sur une typologie/grille de lecture des impacts communément associés au phénomène de coupure,

II - Une deuxième partie propose des pistes pour prendre en compte ces effets au travers des schémas ayant vocation à traiter le phénomène de fragmentation, à savoir les schémas de Trame verte et bleue et notamment les Schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE).

¹ NUITFRANCE. *Base de publications sur la nuit, la biodiversité et la pollution lumineuse*. Par Romain Sordello. Disponible en ligne sur : <http://www.nuitfrance.fr>. Consulté le 25/11/2014

I. LA LUMIERE ARTIFICIELLE COMME SOURCE DE FRAGMENTATION : POINT SUR LA CONNAISSANCE SCIENTIFIQUE

I.1. Description de la problématique

Comme l'espèce humaine, les autres espèces doivent se déplacer pour différents besoins (s'alimenter, se reproduire, se reposer, ...) qu'elles peuvent satisfaire dans des milieux parfois variés. Le mouvement intervient à un moment ou un autre du cycle de vie chez tous les organismes vivants, y compris chez des organismes pour lesquels cela nous semble moins intuitif comme la flore et où il se concrétise en fait notamment par la dispersion du pollen ou la dissémination des graines.

Or, de nombreuses modifications des milieux jouent le rôle de contraintes à ces déplacements : urbanisation, intensification de l'agriculture, modifications des cours d'eau (rectification, barrages, ...), infrastructures de transport.

Ces sources de fragmentation sont désormais bien documentées dans la littérature scientifique. Parmi les sources moins étayées mais dont on pressent qu'elles jouent elles-aussi un rôle de barrière, ou *a minima* de filtre, on peut citer les pollutions telles que celles causées par la lumière artificielle nocturne, les émissions sonores ou encore les produits chimiques (pesticides, ...).

Ce rapport s'intéresse spécifiquement à l'effet fragmentant de la lumière artificielle.

Les sources physiques de fragmentation citées précédemment occasionnent des conséquences que l'on peut schématiquement différencier dans le temps :

- **à court terme : cycle biologique contraint et mobilité modifiée pouvant aller jusqu'à de la mortalité directe par collision,**

- **à moyen/long terme : isolement des populations voire leur extinction par limitation de la dispersion et des échanges métapopulationnels.** Au-delà d'un certain degré d'isolement, les populations peuvent en effet entrer dans une spirale d'extinction, notamment sous l'effet de facteurs stochastiques (génétiques, démographiques, environnementaux).

De nombreuses nuances existent dans la sensibilité à ces phénomènes, selon les espèces en fonction de leurs exigences écologiques (milieu, taille du domaine vital, migrateur/sédentaire, distance de dispersion, ...).

La question posée ici est donc de savoir si la lumière artificielle nocturne est susceptible d'engendrer des conséquences similaires pouvant ainsi se lire selon la même typologie d'impacts que ceux que l'on constate pour la fragmentation matérielle.

I.2. Cycle biologique contraint et mobilité modifiée

C'est la conséquence la plus documentée, à la fois **expérimentalement (*ex-situ*) et naturellement (*in-situ*)**.

Des chercheurs ont montré par exemple que des mâles de Grenouille verte exposés à des lumières artificielles se déplacent plus fréquemment que des individus en ambiance naturelle (Baker & Richardson, 2006). Tabor *et al.* (2004) montrent que la lumière ralentit voire bloque la migration des saumons. Allema *et al.* (2012) montrent aussi que les mouvements du Carabe *Pterostichus melanarius* sont altérés par l'émission de lumière et que les impacts dépendent de la longueur d'onde.

Pour comprendre cet effet de la lumière sur la mobilité, il faut revenir à la lumière elle-même. La lumière est un ensemble de photons (grains de lumière), mais plus précisément elle est caractérisée par une dualité onde/corpuscule. Elle répond en effet également à un comportement ondulatoire. Du fait de ce comportement ondulatoire, les grains de lumière se déplacent et parviennent de cette façon jusqu'à l'œil de l'animal ou jusqu'aux capteurs photosensibles d'une plante, depuis leur source d'émission. L'impact d'un point lumineux va donc bien au-delà du point lumineux lui-même. Un point lumineux agit pour ainsi dire « à distance ».

Moore *et al.* (2000) ont montré que la lumière artificielle urbaine pouvait altérer la migration verticale du zooplancton dans des milieux aquatiques situés à plus de 16 km. L'accumulation des luminaires au sein des villes peut créer une pollution lumineuse agissant sur des zones naturelles situées à des dizaines de kilomètres de la ville elle-même (Albers & Duriscoe 2001 ; Kyba *et al.* 2011).

En revanche, cette action à distance de la lumière est contradictoire, en fonction des espèces que l'on considère. Elle peut se traduire **soit par une attraction soit par une répulsion**.

Au phénomène d'attraction ou de répulsion directe causé par un point lumineux s'ajoute l'association des grains de lumière aux particules atmosphériques en suspension, à l'origine de la formation des halos lumineux, notamment au-dessus des villes. Ces environnements lumineux vont donc eux-aussi, à des échelles plus larges provoquer un effet sur les espèces en fonction de leur **phototactisme** (comportement vis-à-vis de la lumière de type évitement ou orientation).

1.2.A. Pouvoir attractif

> Les espèces qui sont plutôt attirées par la lumière ou qui l'utilise comme repère d'orientation (espèces dites lucipètes, luciphiles ou encore à phototactisme positif) seront globalement désorientées dans leurs déplacements car les halos de pollution lumineuse masquent leurs repères lumineux naturels (lune, étoiles) et les points lumineux artificiels peuvent également les leurrer.

On peut citer deux exemples :

- **Les insectes.** Beaucoup d'entre eux se repèrent avec la lune (Beaudouin, 1985). Dacke *et al.* (2013) ont également récemment démontré que les coléoptères utilisaient le ciel étoilé et en particulier la Voie lactée pour se guider dans leurs déplacements. En conséquence, leurs repères sont brouillés en présence de lumière artificielle. Les insectes volant se retrouvent piégés par les luminaires (cf. figure 1) sous lesquels la probabilité qu'ils meurent par collision/surchauffe/épuisement/prédation est très élevée (Betz, 1961 ; Blab *et al.*, 1988 ; Brusseaux, 1991 ; Lhonoré, 1987). Dès 2006, Eisenbeis (*in* Rich & Longcore, 2006) a théorisé ce phénomène en parlant de :

- « *captivity effect* » lorsque les individus sont détournés de leurs activités ordinaires par la proximité d'une lumière artificielle, les individus sont alors incapables de quitter ces pièges lumineux,

- « *crash barrier effect* » lorsque les individus sont détournés de leurs trajets longues distances par la proximité d'une lumière artificielle et que le trajet initial est donc interrompu.

En 2011, Perkin *et al.* réexpliquent à leur tour clairement l'impact de luminaires, lorsqu'ils sont organisés linéairement (le long d'une route par exemple) en bordure de cours d'eau, sur la dispersion d'insectes aquatiques. Eisenbeis & Hassel (2000) estiment ce pouvoir attractif d'un point lumineux vis-à-vis des insectes entre 50 m (en pleine lune) et 700 m.



Figure 1 : Insectes tournoyant sous un projecteur de stade (Charlety, Paris). Crédit : Vincent Vignon

- **L'avifaune en migration.** Elle se dirige à l'aide du ciel étoilé (Baur *et al.*, 2004 ; Bruderer, 2002 ; Teyssède, 1996) dont la visibilité est donc atténuée voire nulle du fait des halos de pollution lumineuse. Les oiseaux en migration peuvent également être leurrés par les points lumineux de grande ampleur tels que les phares maritimes, les lasers ou les tours éclairées. Bruderer *et al.* (1999) estiment que l'influence d'un faisceau lumineux dirigé vers le haut peut se faire sentir jusqu'à 1 km.

> **Le piège que constitue la lumière peut agir de manière sélective sur une population car le caractère lucipète de certaines espèces varie en fonction de l'âge des individus.**

Dans certains cas, ce sont les jeunes qui sont particulièrement exposés. Chez certaines espèces, la dispersion juvénile (moment où un individu quitte le territoire de naissance pour coloniser un territoire inoccupé) est en effet conditionnée par certaines sources de lumière que les dispersants utilisent comme repères. Compte tenu du caractère essentiel de la dispersion juvénile en termes de flux de gènes et d'individus, ces impacts de la lumière artificielle peuvent avoir des conséquences sur la dynamique de population et la répartition des espèces concernées.

Deux illustrations concrètes à nouveau :

- Chez le **Pétrel de Barau** (*Pterodroma barau*) à la Réunion : les jeunes se dirigent spontanément vers les points lumineux qu'ils pourraient confondre avec une présence de calmars (proies habituelles bioluminescentes) (Imber, 1975 ; Le Corre *et al.*, 2002),

- Chez les **Tortues marines** : les jeunes nés sur une plage se dirigent vers la terre et non vers la mer en présence d'un littoral éclairé car le contraste naturel mer/plage est alors inversé (Nicholas, 2001 ; Salmon, 2003 ; Tuxbury & Salmon, 2005 ; Witherington, 1992 ; Witherington, 1991).

I.2.B. Pouvoir répulsif

> **Les espèces qui fuient la lumière (espèces « lucifuges » ou « luciphobes » ou dites à phototactisme négatif) seront contraintes dans leurs déplacements car la lumière les oblige à se détourner de leur chemin habituel voire les empêche *stricto sensu* d'accéder à des zones vitales.**

Des publications illustrent ce phénomène. Stone *et al.* ont étudié à plusieurs reprises les conséquences de l'éclairage de haies champêtres sur le vol du Petit rhinolophe (*Rhinolophus hipposideros*) (cf. figure 2). Leur protocole a consisté à éclairer artificiellement des haies par des lampes sodium haute-pression (HP) ou par des LED et à constater les éventuelles altérations de la mobilité chez cette chauve-souris :

- avec des lampes sodium HP (Stone *et al.*, 2009), les auteurs confirment une baisse de l'activité très significative et un changement dans le comportement de déplacement et dans l'utilisation des routes de vols,

- avec des lampes LED (Stone *et al.*, 2012), les auteurs vérifient aussi une diminution sévère de l'activité de vol et une modification du comportement de déplacement du côté éclairé des haies. 44 % des individus évitent totalement la lumière : ils survolent la haie bien plus haut que d'habitude, s'en éloignent, voire rebroussement chemin avant même d'atteindre la haie. Lorsqu'ils tolèrent de la longer ils le font largement à distance du dessus ou du côté. Du côté non éclairé, aucune modification de l'activité n'est constatée.



Figure 2 : Petit rhinolophe (*Rhinolophus hipposideros*).
Crédit : Philippe Gourdain

> Comme pour le phototactisme positif, le caractère lucifuge d'une espèce - et donc sa temporalité qui en découle - peut changer au cours de sa vie. Chez la Truite par exemple, les alevins et les juvéniles sont totalement nocturnes et lucifuges alors que les adultes sont diurnes et que les individus âgés sont plutôt crépusculaires (Gigleux & De Billy, 2013).

> Cette fuite de la lumière peut être constatée à des intensités très faibles. Certaines espèces sont sensibles aux variations de la lumière nocturne naturelle elle-même. C'est ce qu'ont montré par exemple Clarke *et al.* (1996) sur un serpent (Crotale des prairies *Crotalus viridis viridis*) en comparant l'activité des individus en fonction des phases lunaires. Leur expérimentation indique que les adultes sont significativement plus actifs en période de nouvelle lune (obscurité maximale). Ces résultats laissent imaginer des conséquences bien plus fortes de l'éclairage artificiel dont le niveau d'éclairage engendré est de fait plus élevé que lors d'une nuit de pleine lune.

> Le phototactisme négatif peut s'expliquer de différentes façons :

- soit par des **faits physiologiques/biologiques**. Les yeux des animaux nocturnes sont adaptés à la vision dans la pénombre du fait de leur forme et de leur composition, qui maximisent le peu de lumière naturelle présente la nuit (Warrant & Johnsen, 2013 ; Warrant, 2004). A contrario, ces systèmes oculaires ne tolèrent pas de recevoir beaucoup de lumière et les individus fuient donc la lumière artificielle pour ne pas être éblouis (Rich & Longcore, 2006),

- soit par une **stratégie comportementale** de réduction de sa propre visibilité vis-à-vis de ses prédateurs. C'est de cette façon que Clarke *et al.* (1996) interprètent leurs résultats sur le Crotale des prairies. Les auteurs supposent également qu'il puisse s'agir d'une adaptation en cascade car les proies de ce serpent cherchent elles-mêmes à minimiser leur risque de prédation et réduisent donc leur activité en cas d'éclairage. Plusieurs études montrent en effet une diminution nette d'activité chez les rongeurs en période de pleine lune (Clarke, 1983 ; Falkenberg & Clarke, 1998).

I.3. Mortalité directe par collision

La biodiversité lors de ses déplacements nocturnes est exposée comme le jour à un phénomène de collision avec les véhicules (trains, voitures, ...) et les infrastructures humaines (bâtis, vitrages, câbles, ...).

De nuit, le trafic est moindre et dans certains cas il est même nul ou quasi nul à partir d'une certaine heure (trafic ferroviaire par exemple). Le risque de collision de nuit devrait donc être amoindri par rapport au risque de jour. En revanche, la lumière artificielle peut accentuer ce risque, voire former des **sources nouvelles de conflits**. La lumière artificielle est par exemple une **source d'éblouissement** susceptible d'accroître la probabilité d'une collision lors de la traversée d'une route par un animal. Chez la Chouette effraie (*Tyto alba*), rapace nocturne, les collisions routières constituent la première cause de mortalité (Guinard & Pineau, 2006). Cet oiseau pratique la chasse en vol et les bords d'infrastructures sont attractifs pour elles du fait de leur caractère ouvert et parce qu'ils sont riches en proies. La lumière rasante des phares des véhicules provoquerait alors un éblouissement en vol lorsqu'un oiseau s'aventure à proximité d'une route, augmentant fortement le risque de collision.

Tous les pièges évoqués précédemment, dus à l'attractivité de la lumière artificielle, peuvent aboutir à de la mortalité. Ce phénomène est fort chez :

- les oiseaux, notamment lors des migrations, qui se heurtent aux immeubles éclairés, phares, plateformes pétrolières, ... (ex : Bruderer, 2002 ; Trapp, 1998)

- les insectes piégés par la lumière des lampadaires qui se retrouvent donc concentrés sur les routes (Perkin *et al.*, 2011).

I.4. Isolement du à l'infranchissabilité de la lumière pour certaines espèces

Visuellement on constate facilement que la lumière artificielle la nuit cause une **rupture du noir** (cf. figure 3). Dans ce phénomène, le comportement ondulatoire de la lumière reprend à nouveau un rôle important car il amène à une sorte de « fusion » des points lumineux par la lumière artificielle qu'ils émettent. Ils forment alors ensemble une **infrastructure lumineuse** qui dépasse l'emprise stricte de chacun de ces points. Par exemple, pour une route éclairée, un fuseau d'éclairage continu peut se former sur l'ouvrage même si les points lumineux sont espacés et ce fuseau est par ailleurs plus large que l'ouvrage. Sans parler de coupure jointive, on peut aussi observer facilement que la lumière artificielle est à l'origine d'un **mitage du noir de la nuit** qui crée des espaces relictuels.

Sur un plan structurel, il semble donc évident de parler d'un phénomène de fragmentation par la lumière artificielle nocturne, même s'il s'agit d'une fragmentation un peu particulière du fait de son caractère « **immatériel** ». Sur un plan fonctionnel, la connaissance scientifique est en revanche encore faible sur les conséquences de cette infrastructure lumineuse sur la biodiversité.

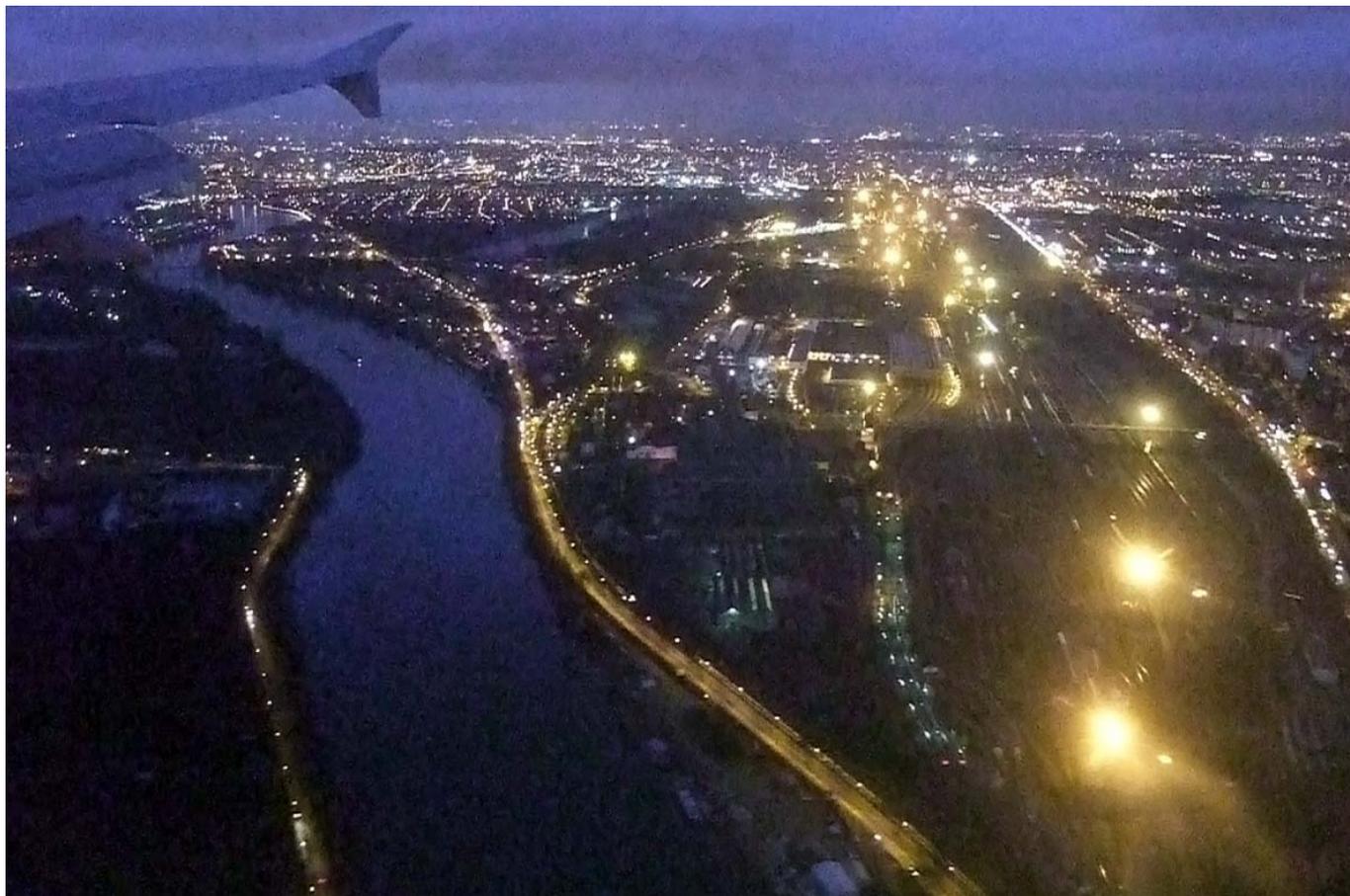


Figure 3 : Vue aérienne lors d'un atterrissage de nuit à l'aéroport d'Orly. Crédit : Vincent Vignon

Cependant, tous les effets vus précédemment de la lumière artificielle sur les déplacements des espèces amènent à suspecter des conséquences fortes de coupure voire d'isolement chez les espèces concernées. Gaston *et al.* (2014) vont jusqu'à émettre l'hypothèse que, compte tenu de la proportion d'espèces nocturnes/crépusculaires au sein de la biodiversité, la fragmentation par la lumière a été réellement sous-estimée jusqu'ici et pourrait en fait avoir une place prépondérante parmi les différentes sources de fragmentation.

Quelques études donnent d'ores et déjà des premiers éléments de démonstration.

L'étude la plus probante a été menée sur le Puma (*Felis concolor*) en Californie en utilisant la technique du radiopistage (Beier, 1995). Celle-ci montre que **les jeunes dispersent par des trajets en zones noires et que *a contrario* les zones éclairées ne sont pas franchies.**

Les résultats de Clarke *et al.* (1996) évoqués précédemment vont également dans ce sens car ils montrent qu'en période d'éclairage naturel fort, les adultes chez le serpent *Crotalus viridis viridis*, en plus d'avoir une activité globalement réduite, **évitent les zones ouvertes (donc des zones éclairées) et limitent leurs déplacements aux haies (donc des zones sombres).** Il ne s'agit pourtant ici que des variations de l'éclairage naturel de la nuit et on peut donc supposer là encore que l'éclairage artificiel, dont le niveau est bien plus élevé, a des conséquences *a minima* similaires mais sûrement plus fortes.

Concernant les **milieux aquatiques, les ponts sur les rivières peuvent jouer le rôle de barrière optique pour les insectes effectuant des déplacement longitudinaux le long des cours d'eau** (Malnas *et al.*, 2005, Perkin *et al.*, 2011). Il s'agit bien d'une barrière optique car les animaux rebroussement chemin à une certaine distance du pont, sans parvenir à le franchir ni sans entrer en collision avec lui mais en perdant en revanche une énergie inutile qui peut par exemple amener les femelles à mettre bas à proximité du pont dans des endroits défavorables.

Riley *et al.* (2013) prouvent également que la dispersion des saumons, qui est une étape fondamentale dans la dynamique des populations, est freinée par le niveau d'éclairage de l'eau du à la présence d'éclairage sur les voies bordant les cours d'eau.

L'effet barrière de la lumière artificielle est par ailleurs déjà prouvé par l'absurde puisque la lumière est précisément utilisée comme garde-fou pour aiguiller certaines espèces, telles que les chiroptères, vers des passages-à-faune. Par exemple au Pays de Galles, des bornes lumineuses de 1 m de haut ont été installées tous les 10 m de part et d'autres d'une route pour éloigner des Grands-rhinolophes de tronçons particulièrement accidentogènes (Nowicki *et al.*, 2009).

Comme pour la fragmentation physique, la fragmentation liée à la lumière peut être considérée à différentes échelles spatiales. En effet, l'éclairage lui-même peut être abordé sous un angle multi-échelle, notamment :

- en considérant des points lumineux individualisés (ex : une simple lampe d'éclairage d'un monument peut impacter une colonie de chiroptères),
- en considérant plusieurs points lumineux, une zone éclairée (une route bordée de lampadaires, un quartier,...),
- en considérant l'effet de halo lumineux, prononcé au-dessus des villes.

Des conséquences sont alors fortement supposées à toutes ces échelles territoriales et donc aux différentes échelles du vivant (population, métapopulation, aire de répartition, ...). Perkin *et al.* (2011) estiment que la lumière agit sur un certain nombre de facteurs populationnels (sex ratio, taille effective, ...) qui, au final, ont un effet sur la dynamique de ces populations et sur leur diversité génétique.

I.5. Autres effets

I.5.A. Réactions en chaîne

D'une part, la lumière peut avoir sur une espèce des **effets physiologiques** qui vont à leur tour avoir des conséquences en chaîne sur ses déplacements. Par exemple, la lumière modifie l'équilibre du sommeil et donc les horaires d'activités d'une espèce (Le Tallec *et al.*, 2013) qui peut en conséquence être amenée à avoir moins de temps pour se déplacer. On peut aussi citer les effets connus d'un éclairage nocturne à proximité de colonies (trou de sortie du gîte) de parturition chez le Murin à oreilles échanquées (*Myotis emarginatus*). En sortant plus tardivement de leur gîte éclairé, les femelles ne bénéficieraient pas du pic d'abondance des proies qui émergent au crépuscule, ce qui induirait indirectement un décalage des dates de naissance et/ou un taux de croissance des juvéniles plus faible, d'où une plus grande fragilité à l'origine d'une surmortalité (Boldogh *et al.* 2007),

D'autre part, les effets observés sur les déplacements d'une espèce peuvent être la conséquence d'effets antérieurs de la lumière artificielle sur d'autres taxons. On peut à ce sujet évoquer la **cascade d'impacts constatée en milieu marin** : la lumière des stations pétrolières augmente la croissance d'algues, cela attire le zooplancton, qui attire les poissons, qui attirent les oiseaux marins, lesquels peuvent se tuer à proximité des torchères ou en entrant en collision avec les stations (Burke *et al.*, 2005 ; Montevicchi, 2006 ; Wiese *et al.*, 2001),

Enfin, tous les effets évoqués jusqu'ici sur les déplacements d'une espèce peuvent avoir des conséquences en chaîne sur d'autres espèces que la lumière ne perturbe pas directement. Ceci est démontré notamment sur la flore du fait de la contrainte exercée sur les chauves-souris frugivores qui ont un rôle majeur dans la **dissémination des graines** (Lewanzik & Voigt, 2014). Il existe par ailleurs un processus de co-évolution entre **plantes et insectes pollinisateurs** parmi lesquels les papillons de nuit ont une place fondamentale (Young, 2002). L'entrave aux déplacements de ces insectes (ex : Van Langevelde *et al.*, 2011) pourrait ainsi avoir des conséquences en chaîne sur la survie de populations végétales tout à fait éloignées de sources lumineuses.

I.5.B. Cas des espèces favorisées par la lumière

La lumière artificielle la nuit modifie l'alternance naturelle des périodes obscures et des périodes éclairées, que nous qualifions respectivement sous nos latitudes de jour et de nuit, et en ce sens **elle altère un équilibre**.

Les espèces nocturnes ne sont donc pas seules concernées par ce sujet. Des espèces diurnes, des oiseaux par exemple comme le Faucon pèlerin (*Falco peregrinus*), ont la possibilité de prolonger leur activité de chasse sur la période nocturne du fait de l'éclairage artificiel (Morelli *et al.*, 2014 ; Decandido & Allen, 2006). Ces espèces tirent alors des bénéfices, du moins à court terme, de la lumière artificielle.

Cependant, une **vision globale** est nécessaire :

- comme nous l'avons vu en introduction, la majorité de la biodiversité est nocturne (Holker, 2010b) donc cette partie de la biodiversité susceptible d'être favorisée par l'éclairage artificiel (espèces diurnes) est minime par rapport à l'ensemble du vivant,

- les bénéfices pour ces espèces diurnes sont à analyser sur plusieurs critères :

- si les espèces diurnes ont une activité prolongée, leur cycle du sommeil est altéré autant que les espèces nocturnes, avec des conséquences collatérales possibles pour elles-aussi sur le vieillissement, les équilibres hormonaux, leur

santé. Il est prouvé par exemple que la lumière artificielle nocturne modifie le succès reproducteur chez des oiseaux diurnes (Kempnaers *et al.*, 2011),

- le fait que des espèces diurnes soient actives plus longtemps a des conséquences à l'échelle des équilibres écosystémiques (rapports proies/prédateurs par exemple) (Perkin *et al.*, 2011). Garber (1978) explique comment un lézard, initialement plutôt diurne, va déplacer sa niche écologique pour coloniser la niche nocturne (notion de « night-light-niche ») afin de profiter de la concentration en insectes autour des points lumineux.

Chez les espèces nocturnes aussi, certains animaux semblent tirer profit de l'éclairage artificiel, par exemple lorsqu'il amène à une concentration de leurs proies (insectes) sous les lampadaires pour certaines chauves-souris. En revanche, il s'agit sans doute d'un **compromis avantages/risques tolérés** pour l'alimentation mais qui n'efface pas la préférence pour l'obscurité pour d'autres activités (déplacements par exemple).

Une étude intéressante montre en sens inverse ces aspects de « trade-off » chez une souris (*Peromyscus leucopus*) (Zollner & Lima, 1999). De manière expérimentale, les auteurs constatent que ce rongeur ne parvient pas à transiter d'un habitat favorable à un autre distant de 30 m dans l'obscurité alors qu'il y parvient jusqu'à 60 m en période de pleine lune. Malgré cela, cette souris privilégie les moments obscurs pour se déplacer, vraisemblablement car cela diminue le risque de prédation due à sa propre visibilité qui est forte en contexte éclairé. Les auteurs concluent ainsi à une stratégie « *look now and move later* » (regarder maintenant mais se déplacer plus tard) : le rongeur utiliserait les informations de son environnement, qu'il capte mieux en période éclairée, pour se déplacer ensuite en contexte obscur moins directement discernable mais plus sûr d'un point de vue prédation.

Enfin, il est important de comprendre que **le classement d'une espèce en nocturne ou diurne est une simplification**. Premièrement une même espèce peut effectuer certaines activités de jour et d'autres de nuit (cas des oiseaux migrateurs par exemple). Deuxièmement, de nombreuses espèces semblent plutôt actives au crépuscule et à l'aube. Comme une transposition de ce que l'on constate pour l'espace avec le concept d'écotone, ces deux charnières temporelles peuvent être qualifiées de « **chronotone** » et constituent des moments particulièrement riches en activité. Mécaniquement, on retrouve en effet au coucher du soleil des espèces diurnes qui finissent leur activité et des espèces nocturnes qui la commencent, et inversement à l'aube (cf. figure 4).

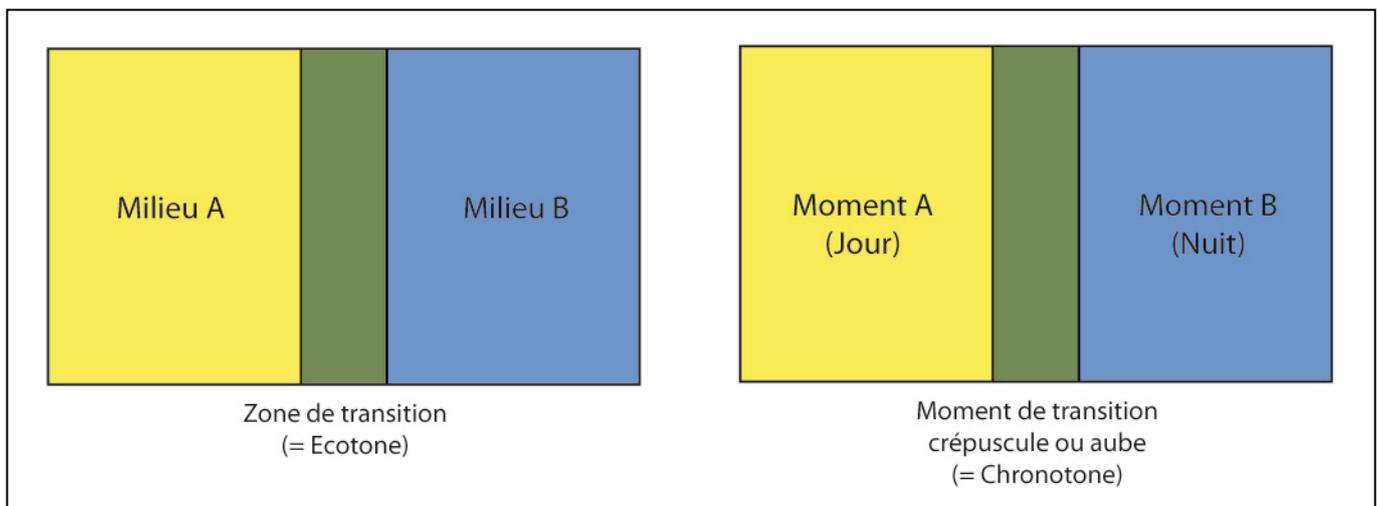


Figure 4 : Concept de chronotone calqué sur celui d'écotone. Crédit : Romain Sordello

I.5.C. Effets à l'échelle des communautés

Comme on le constate pour d'autres pressions anthropiques, par exemple pour le changement climatique contemporain, les effets de la lumière artificielle sur les espèces se répercutent à l'échelle des communautés.

L'existence des réactions en chaînes et le fait que les réponses spatiales et temporelles vis-à-vis de la lumière artificielle sont différentes en fonction des espèces (attraction, répulsion, barrière opaque ou filtre, ...) vont en effet entraîner des recompositions des assemblages d'espèces dans leur ensemble. Davies *et al.* (2012) ont déjà montré que l'éclairage d'une rue modifie les communautés d'invertébrés pour 5 groupes biologiques (opilions, fourmis, carabes, cloportes, amphipodes).

On peut globalement dire que **la lumière artificielle agit comme un filtre** qui favorise certaines espèces (en l'occurrence les espèces indifférentes ou tolérantes vis-à-vis de l'alternance jour/nuit et adaptables dans leurs sens de perception, non photosensibles) au détriment d'autres espèces à fortes exigences écologiques, à niches écologiques réduites et présentant des

spécificités dans leurs sens de perception (photosensibles). A ce titre, la lumière artificielle deviendrait même un nouveau facteur de sélection (Holker, 2010).

Par exemple, Polak *et al.* (2011) constatent que certaines chauves-souris ne transitent pas par la lumière ou le font avec un comportement altéré, ce qui leur crée un désavantage par rapport à d'autres chiroptères du même écosystème qui y parviennent, causant ainsi un déséquilibre du cortège faunistique.

Les déséquilibres peuvent aussi provenir des modifications d'interactions interspécifiques comme les liens trophiques ou les liens de pollinisation évoqués précédemment. A ce titre, Arlettaz *et al.* (2000) émettent l'hypothèse d'une exclusion compétitrice du Petit rhinolophe (*Rhinolophus hipposideros*) par la Pipistrelle commune (*Pipistrellus pipistrellus*) en milieu éclairé.

Au final, c'est le fonctionnement des écosystèmes qui est remis en cause par la lumière artificielle et ce faisant les services qu'ils rendent à l'humanité (Lewanzik & Voigt, 2014 ; Lyytimäki, 2013).

Ce phénomène de discrimination n'est pas propre à la lumière artificielle et caractérise même les processus d'artificialisation des milieux qui, d'une manière générale, privilégient les espèces généralistes et ubiquistes à la défaveur des espèces spécialistes. **La lumière vient donc comme une contrainte supplémentaire.** Pour reprendre le cas d'une infrastructure linéaire de transport, la nuit, la fragmentation « matérielle » causée par cet ouvrage est toujours là ; la lumière artificielle crée une fragmentation « immatérielle » additionnelle.

I.6. Prise de recul sur la connaissance

Globalement **peu de publications scientifiques s'intéressent spécifiquement à la lumière comme contrainte aux déplacements et source de fragmentation.** Il existe surtout des études sur les effets biologiques ou comportementaux de la lumière.

En revanche, certaines publications peuvent évoquer les effets de la lumière sans que le protocole n'ait vraiment été construit pour cela. Dans ce cas, les résultats peuvent être difficiles à interpréter et le faire peut risquer d'amener à des contre-sens. Par exemple, dans une publication sur la Chouette chevêche (*Athene noctua*), les auteurs ont relevé les cadavres sur des routes et constatent ensuite que les routes éclairées engendrent très nettement moins de collisions (environ 2 % des 418 cadavres) (Hernandez, 1988). Dans une telle étude, doit-on en déduire que la lumière facilite la vue des conducteurs et/ou de la faune traversante ou bien au contraire que la lumière engendre une fragmentation totale qui empêche toute tentative de traversée et donc de collision ?

Par ailleurs, comme dans de nombreux cas où l'on souhaite étudier l'effet fragmentant d'un élément en particulier, la tâche est difficile en raison des **nombreux paramètres confondants (parasites) qui peuvent provoquer eux-aussi de la fragmentation sans que l'on puisse les isoler.** Dans le cas spécifique de la lumière, il s'agit justement d'une pollution relativement connexe à l'urbanisation (même si la lumière agit à distance, les points lumineux sont liés aux infrastructures grises : routes, villes, bâti, ...) ce qui rend encore plus difficile la possibilité de ségréger la fragmentation causée strictement par elle (Threlfall *et al.*, 2013).

Ainsi, l'outil génétique, qui permet de vérifier un véritable isolement de population paraît assez peu approprié pour connaître spécifiquement les effets de la lumière car il aboutit à une description de la perméabilité globale du paysage sans distinction des sources de coupure, sauf cas particuliers de « protocole idéal ». En revanche, les méthodes « traditionnelles » de suivi, le radiopistage notamment, peuvent fournir des éléments précis sur le comportement de déplacement, les voies empruntées ou encore les horaires d'activités, directement rattachables au contexte lumineux, du moins d'un point de vue corrélatif. Dans les faits, le manque de prise de conscience qui persiste toujours actuellement sur les enjeux liés à la pollution lumineuse, rend relativement rare encore le réflexe d'intégrer des mesures de lumière dans les études de télémétrie.

Pour d'autres espèces, le recours au piégeage peut permettre de mieux comprendre l'influence de la lumière sur la mobilité. Chez les insectes par exemple on peut utiliser des pièges Malaise en marquant les insectes avec une peinture fluorescente ou par un isotope traceur stable pour étudier la dispersion en réaction à la lumière (Macneale *et al.*, 2005).

Encore lacunaire, la connaissance sur l'effet fragmentant de la lumière devrait s'accroître dans les années à venir avec l'augmentation globale des publications sur le thème de la pollution lumineuse, le lancement d'appels à projet ou de thèse sur ces sujets. Une thèse prenant comme modèle les chiroptères est en cours depuis 2013 au CESCO (Doctorante : Clémentine Azam ; Encadrants : Christian Kerbiriou & Isabelle Leviol).

I.7. Possibilité pour plusieurs espèces de décrire un état initial

S'il est difficile de trouver des publications démontrant spécifiquement l'effet barrière qu'a la lumière sur une espèce, la littérature est en revanche abondante, pour certaines espèces au moins, sur leurs rythmes biologiques naturels (journalier ou

annuel). **Sans entrer directement sous l'angle « pollution et impacts », il est donc possible de définir un état initial des comportements de plusieurs taxons vis-à-vis de l'alternance naturelle de la lumière.**

Nous prendrons ici l'exemple du Cerf élaphe (*Cervus elaphus*). La littérature est riche concernant la périodicité des déplacements de ce mammifère.

Cette espèce montre une alternance assez marquée d'activité entre jour et nuit, qui l'amène même à fréquenter des habitats distincts (Ager *et al.*, 2003 ; Georgii, 1981 ; Georgii, 1980). Le jour, les individus sont remisés en forêt alors que la nuit, les individus pâturent dans des milieux ouverts. Des mouvements pendulaires se produisent ainsi au moment du crépuscule et de l'aube entre milieux fermés et milieux ouverts (qui peuvent être intraforestiers). Par ailleurs, la mobilité de cette espèce témoigne également d'une périodicité saisonnière (Baghila *et al.*, 2007 ; Kleveland, 2007 ; Pépin *et al.*, 2008). Certaines populations pratiquent des migrations entre leurs territoires d'été et leurs territoires d'hiver.

En revanche, aucune étude ne semble avoir mesuré l'impact de la lumière artificielle sur cette périodicité et si la lumière artificielle est à même d'empêcher les cerfs d'effectuer leurs mouvements pendulaires. Il faut noter que là encore des facteurs confondants peuvent exister car ces rythmes sont aussi intimement liés à d'autres paramètres que la lumière tels que le dérangement humain, la chasse ou le niveau de prédation qui détermine des mouvements plus ou moins forts chez les cerfs.

Plusieurs études précédemment évoquées montrent aussi les **enseignements que l'on peut tirer du suivi d'espèces en éclairage naturel** au regard des modifications de la mobilité dont elles témoignent en fonction des variations des phases lunaires par exemple. En considérant l'éclairage artificiel comme d'intensité bien supérieure à la luminosité de la pleine lune, ces publications permettent de pressentir des conséquences *a minima* similaires - mais sûrement bien plus fortes - de l'éclairage artificiel sur les taxons concernés.

Nous avons vu dans cette première partie que la lumière répond elle aussi à la typologie des impacts habituellement associés au phénomène de fragmentation causé par les sources physiques même si la connaissance reste inégale ensuite entre les différentes conséquences de cette coupure (isolement génétique notamment). Ce constat confirme dans tous les cas la pertinence à considérer l'éclairage nocturne comme une infrastructure fragmentante.

La partie II. qui suit fait des propositions pour prendre en compte la lumière artificielle au cours d'une démarche d'élaboration d'un schéma de Trame verte et bleue - dont l'objectif est précisément la réduction de la fragmentation des habitats - et notamment d'un Schéma régional de cohérence écologique. Rappelons que les Orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques approuvées par le décret du 20/01/2014 mentionnent comme l'un des objectifs de la Trame verte et bleue la réduction des pollutions connexes à l'urbanisation, notamment la pollution lumineuse.

II. PISTES ET REFLEXIONS POUR LA PRISE EN COMPTE DE LA LUMIERE ARTIFICIELLE DANS UNE DEMARCHE DE TRAME VERTE ET BLEUE

La démarche d'élaboration des Schémas Régionaux de cohérence écologique (SRCE) et plus largement d'un schéma de Trame verte et bleue quelle qu'en soit l'échelle, se déroule généralement selon les 3 étapes suivantes :

1. **L'identification des éléments de trames** c'est-à-dire des réservoirs et des corridors. Le décret relatif à la Trame verte et bleue définit en effet les continuités écologiques, formant la trame, comme un ensemble de réservoirs et de corridors,
2. **L'identification de points de conflits** c'est-à-dire des éléments faisant obstacles à ces continuités écologiques,
3. **La constitution d'un plan d'action** (appelé Plan d'action stratégique dans le cas des SRCE) qui propose notamment des mesures de préservation ou de restauration (résorption de points de conflits par exemple) et qui est aussi l'occasion de prévoir des efforts de connaissances à mener pour réduire les lacunes.

Les sous-parties suivantes formulent des propositions pour prendre en compte l'enjeu pollution lumineuse à ces 3 étapes, sous des formes et des objectifs différents.

II.1. L'étape d'identification des éléments de trame (corridors/réservoirs)

II.1.A. Pour les réservoirs

Deux grandes voies d'identification complémentaires existent pour l'identification de réservoirs de biodiversité :

- La reprise des zonages existants

La première voie « spontanée » pour l'identification de réservoirs de biodiversité est la reprise des zonages existants, notamment ceux dont l'objectif dominant est la préservation de la biodiversité (Réserves naturelles, Parcs nationaux, sites Natura 2000, ...).

Pour rappel, dans le cadre des SRCE, l'intégration *stricto sensu* des zonages existants est obligatoire en ce qui concerne les cœurs de parcs nationaux, les réserves naturelles (nationales, régionales, de Corse) et les arrêtés de protection de biotope. Les autres types de zonages (ZNIEFF, Sites classés, ...) doivent être étudiés au cas par cas et leur non intégration comme réservoir de biodiversité doit être justifiée.

Cette première voie d'identification de réservoirs semble très cohérente pour une intégration du paramètre « obscurité », dans la mesure où ces zonages peuvent être *a priori* considérés comme les espaces les plus exempts de pollution lumineuse. Les espaces tels que les parcs nationaux ou les parcs naturels régionaux sont également des acteurs proactifs dans la réduction des nuisances lumineuses. Pour contribuer à ces actions, le MNHN-SPN a produit un rapport de propositions de mesures pour réduire la pollution lumineuse dans les espaces naturels (Sordello, 2011).

- L'identification de zones nouvelles

Afin que la trame ne se limite pas à un réseau de zonages préexistants, des réservoirs de biodiversité « complémentaires » peuvent être identifiés sur des espaces dont la qualité écologique les rend candidats au statut de réservoir de biodiversité.

Cette qualité est généralement appréciée par la présence d'espèces indicatrices ou par des paramètres paysagers de forme ou de densité d'éléments favorables (par exemple une densité de haies, une surface minimale de forêt d'un seul tenant, ...).

Dans ce processus, le paramètre « obscurité » peut alors s'ajouter pour la mesure de cette qualité écologique. La présence d'espèces lucifuges ou le degré d'obscurité peuvent ainsi devenir des critères d'éligibilité nouveaux (cf. figure 5).

L'exemple schématisé par la figure 1 permet cependant de constater que l'ajout du paramètre « pollution lumineuse » peut amener à identifier un réservoir de biodiversité de plus petite surface. Ce point est réabordé plus loin au sujet de la question des sous-trames et dans la partie II.4. qui fait un bilan atouts/faiblesses des différentes approches.

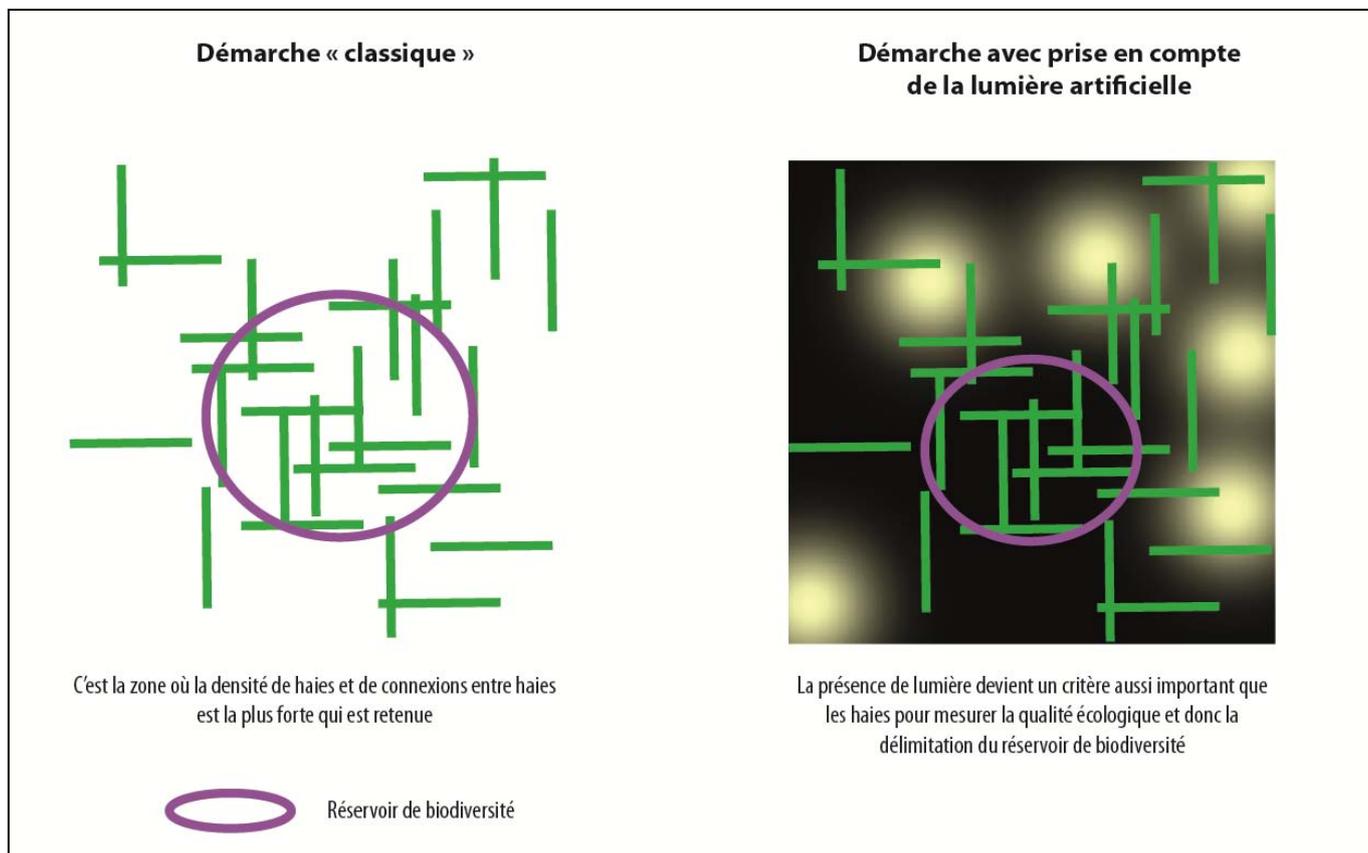


Figure 5 : Illustration schématique du principe d'intégration de la lumière artificielle pour la désignation d'un réservoir de biodiversité. Crédit : Romain Sordello

II.1.B. Pour les corridors

Deux méthodes sont principalement utilisées pour identifier des corridors :

- la méthode du chemin de moindre coût,
- la méthode de dilatation/érosion.

- La méthode du chemin de moindre de coût

Cette méthode vise à retenir les chemins les moins contraignants pour le déplacement du vivant permettant de relier entre eux les réservoirs de biodiversité. Pour être exécutée, elle nécessite la constitution préalable d'une **carte de friction** ou de rugosité qui affecte à chaque type d'occupation du sol des coefficients en fonction de leur caractère facilitant ou freinant pour les flux des espèces étudiées.

La lumière artificielle pourrait donc être intégrée comme un critère supplémentaire pour l'attribution des coefficients de rugosité (cf. figure 6). Concrètement, une maille éclairée de nuit pourrait correspondre à un coefficient moins fort qu'une maille non éclairée du même type d'occupation du sol, pour une espèce lucifuge.

- La méthode de dilatation/érosion

Pour rappel, cette méthode applique à partir des réservoirs de biodiversité un tampon puis le retire consécutivement depuis la périphérie ; le tampon est de largeur identique dans les deux cas. Cela a pour effet de faire apparaître les espaces interstitiels pouvant être considérés comme des corridors potentiels.

Dans cette méthode, il semble également tout à fait faisable d'y intégrer un critère « obscurité », à travers la distance tampon appliquée. Cette distance représente classiquement le maximum qu'une espèce peut parcourir en dehors de son milieu de prédilection (réservoirs). En ajoutant le paramètre « lumière », ce tampon représenterait donc la distance maximale que l'espèce est capable de parcourir en environnement lumineux à partir des zones obscures qu'elle préfère (réservoirs).

A noter que comme toute méthode de dilatation/érosion, cette démarche ne tient pas compte de la qualité du milieu pris dans le tampon (ici de présence ou non de lumière artificielle). Il s'agit d'une distance euclidienne appliquée à partir des réservoirs

puis retranchée, de manière à disposer des jointures de distance adéquate entre réservoirs. A ce titre, la méthode de dilatation/érosion, sans doute encore davantage que la méthode des chemins de moindre coût (qui reste néanmoins aussi une modélisation), nécessite une confirmation des corridors potentiels identifiés (par du dire d'expert, du travail de terrain, de la confrontation avec des cartes de pollution lumineuse, ...).

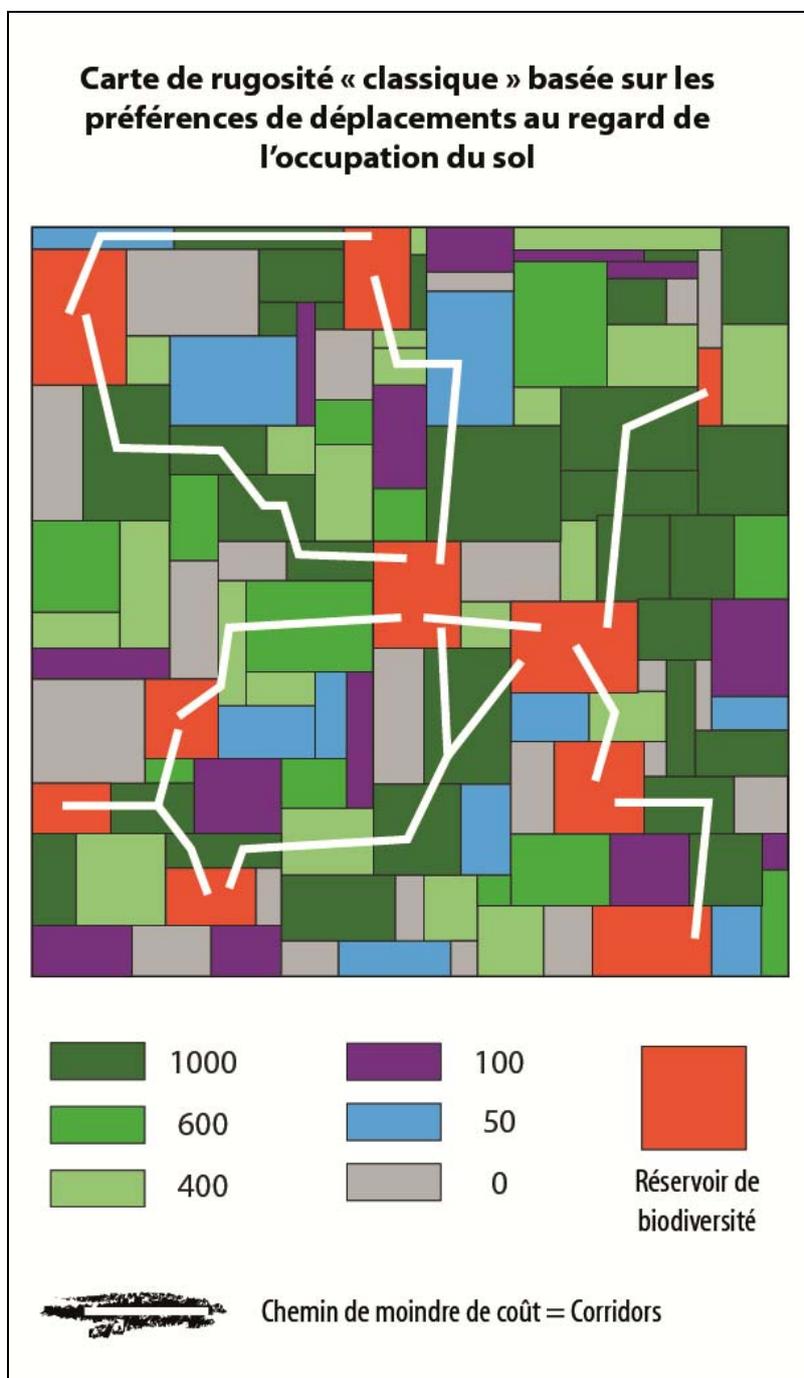


Figure 6 : Méthode du chemin de moindre coût pour l'identification des corridors (ici sans prise en compte de la lumière). Plus le coefficient est fort plus le milieu est facilitant. Crédit : R. Sordello

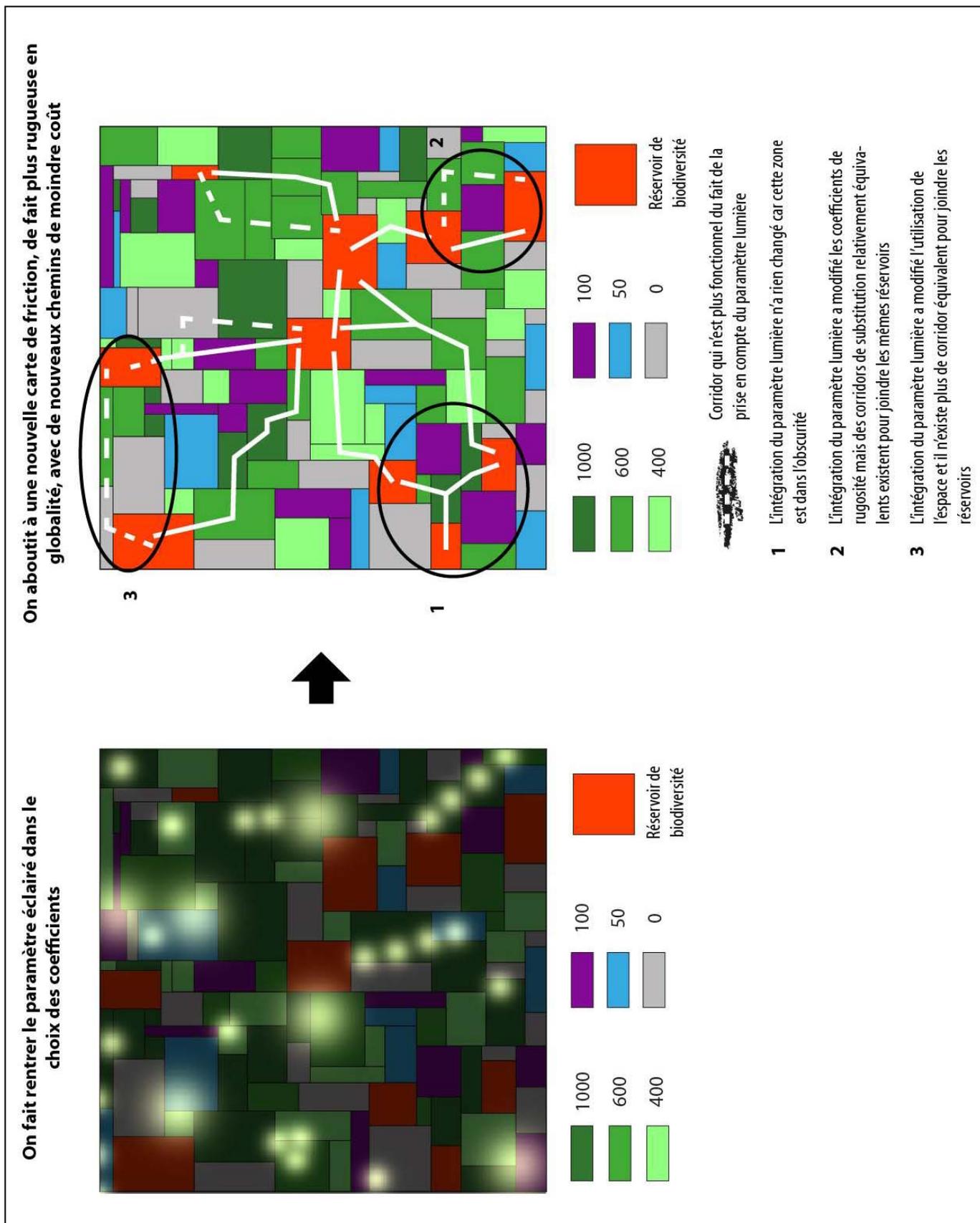


Figure 6 suite : Méthode du chemin de moindre coût pour l'identification des corridors (ici avec prise en compte de la lumière). Plus le coefficient est fort plus le milieu est facilitant. Crédit : Romain Sordello

II.1.C. La question des sous-trames

- **Adopter une approche globale**

Il est très important de faire en sorte que cette avancée que constitue la prise en compte de la lumière artificielle pour l'identification des éléments de TVB ne se traduise pas dans le même temps par un recul vis-à-vis des démarches « classiques » développées jusqu'ici. En effet, se focaliser sur les contraintes exercées par la lumière artificielle risquerait d'occulter les aspects « milieux » qui restent tout aussi importants.

Si l'on prend comme exemple le Grand rhinolophe (*Rhinolophus ferrumequinum*), cette chauve-souris possède de nombreuses exigences (Sordello, 2013b) :

- en termes d'éléments du paysage (bocage avec haies arborées et larges) car cette espèce utilise les linéaires de végétation comme des repères pour son vol,
- en termes de pratiques de gestion du paysage (présence de parcelles pâturées au sein du maillage de haies, pas de produits vétérinaires sur le bétail) car cette espèce se nourrit principalement de bousiers,
- en termes d'organisation structurée de ces éléments (haies connectées en réseau),
- fortement lucifuge, cette espèce recherche l'obscurité.

A ce jour, les démarches d'élaboration des réseaux écologiques prennent bien en compte les aspects paysagers/gestion mais sans doute assez peu les aspects « obscurité ». Pour autant, se concentrer sur ces dernières exigences risque de faire perdre les aspects paysagers tout aussi fondamentaux. Les recherches de Picchi *et al.* (2013) montrent également cette importance pour la Luciole (*Luciola italica*) chez qui la survie des populations est conditionnée conjointement par des critères paysagers (couvert végétal) et par le niveau d'éclairement.

L'idéal est ainsi de parvenir à une approche globale pour l'identification des réservoirs et corridors, qui intègre l'ensemble des exigences des espèces dans leurs déplacements : la lumière artificielle (barrière immatérielle dépendante de la notion de temps) et les autres sources de perturbations de la mobilité déjà prises en compte (barrières physiques « intemporelles »). D'autres sources de fragmentation encore, comme la pollution sonore ou chimique, seraient d'ailleurs à considérer également pour une approche réellement complète.

Dans les méthodes présentées précédemment, d'identification de réservoirs et de corridors, la lumière vient bien s'ajouter comme un critère supplémentaire aux critères paysagers/physiques déjà pris en compte et qui le restent.

- **Adopter cette démarche pour chaque milieu**

Pour être complète, cette intégration de la lumière artificielle doit se faire pour les différents types de milieu (forêts, cours d'eau, ...).

En ce qui concerne la Trame verte et bleue régionale, le décret relatif à la Trame verte et bleue demande à ce que le SRCE adopte un découpage par milieu et identifie au minimum 4 sous-trames (5 en contexte littoral) : milieux boisés, milieux ouverts, milieux humides, milieux aquatiques, milieux littoraux. Toutes les sous-trames retenues par un SRCE doivent pouvoir être rattachées à ces 4-5 sous-trames « de base ».

Cette disposition réglementaire permet ainsi pleinement d'intégrer le paramètre « lumière artificielle » pour l'identification des éléments de TVB, pour chaque sous-trame.

- **Quelque chose en plus**

Enfin, nous avons vu que l'ajout du paramètre « obscurité » ou « lumière artificielle » pour l'identification des éléments de TVB peut amener à retenir des éléments réduits par rapport aux démarches classiques puisque de fait un critère nouveau est venu s'ajouter pour mesurer la qualité écologique. **Il semble donc important que ces éléments de TVB identifiés avec le paramètre additionnel « obscurité » forment des sous-trames supplémentaires afin de ne pas exclure des espaces pouvant être tout à fait fonctionnels pour les espèces diurnes.**

Au final, pour une efficacité maximale, il est donc proposé :

1. D'intégrer le paramètre lumière/obscurité dans l'identification des éléments de TVB de chaque milieu (sous-trames du décret TVB),
2. D'ajouter pour chaque sous-trame une « sous-sous-trame » spécifique afin de ne pas exclure des éléments pouvant être fonctionnels pour la faune diurne,
3. De considérer pour chaque « sous-sous-trame » la lumière artificielle comme un élément fragmentant comme les autres afin de conserver une approche globale pour la faune nocturne (exigence de noir et exigence paysagère). A noter que le « comme les autres » ici revient en l'état à un réhaussement, compte tenu de la faible considération de ces aspects à l'heure actuelle.

II.2. Lors de l'identification de points de conflits

Une fois les continuités écologiques identifiées, cette étape vise à repérer les points d'intersection problématiques (ou « points de conflits ») qui se forment avec des éléments hostiles aux flux, dits éléments fragmentants. Cette étape consiste généralement à croiser les continuités écologiques identifiées, avec les éléments considérés comme fragmentants, de manière à faire ressortir les intersections, que l'on peut ensuite hiérarchiser et pour lesquelles il faut ensuite confirmer ou non le caractère conflictuel. A ce jour, cette étape de croisement dans les démarches de réseaux écologiques se fait essentiellement en considérant des structures fragmentantes physiques (routes, rails, urbanisation, ...) et par ailleurs souvent à dire d'expert.

L'idée développée ici est donc d'effectuer ce croisement également à partir des cartographies de pollution lumineuse de manière à visualiser les points de conflits lumineux (cf. figure 7). Là encore cette opération doit idéalement être effectuée pour les différentes sous-trames du réseau écologique afin de vérifier les blocages existants pour toute la palette de milieux.

Cette approche est celle appliquée par le Parc naturel régional des Causses du Quercy dans son étude pilote sur la prise en compte de la pollution dans sa trame verte et bleue (Granier, 2012). Des cartographies de pollution lumineuse ont été superposées aux différentes sous-trames de la Trame verte et bleue du parc afin d'identifier d'éventuelles zones de blocages ou isolées par la lumière artificielle.

II.3. A travers le plan d'action

> L'identification d'un réseau écologique n'est pas une fin en soi. Celui-ci doit ensuite être animé dans le temps pour en préserver les éléments de meilleure qualité et restaurer ceux dont la fonctionnalité est réduite ou altérée.

Pour rappel, en ce qui concerne les SRCE, le décret relatif à la TVB et le document-cadre des ONTVB demandent :

- que le plan d'action stratégique (PAS) comporte des **actions prioritaires**. La résorption des obstacles terrestres et aquatiques (points noirs, points de conflits) font partie des actions pouvant répondre à ce statut prioritaire,

- qu'à chacun des réservoirs et des corridors de la trame régionale, soit assigné **un objectif de restauration ou de préservation en l'état**.

L'étape de repérage des points de conflits décrite en I.2. est donc un préalable précieux car la présence de points de conflits est un préalable pour évaluer la fonctionnalité écologique des réservoirs et des corridors. Le fait d'avoir identifié ces points de conflits en tenant compte du paramètre lumière (comme décrit en II.2.) peut donc être un moyen de prioriser ensuite les éléments de TVB à maintenir en l'état ou à restaurer au regard de la pollution lumineuse. Une hiérarchisation entre les effets barrières (lumière artificielle uniquement ou venant en addition à une barrière physique) peut aboutir à une **priorisation globale** des points de conflits et donc des objectifs de restauration.

Dans les cas des SRCE, outre la résorption des obstacles, les PAS peuvent comporter toute une série de mesures, qui elles aussi peuvent être fléchées comme prioritaires, à mettre en œuvre pendant la phase d'application du SRCE, par les porteurs du SRCE eux-mêmes (CR/DREAL) ou par des acteurs s'étant déclarés volontaires pendant la concertation. Pour rappel, le SRCE ne peut interdire mais il peut préconiser c'est-à-dire indiquer ce qui serait favorable de faire et de ne plus faire pour maintenir ou restaurer la fonctionnalité des continuités écologiques. Les actions du plan d'action d'un SRCE peuvent également être de l'ordre de l'accompagnement ou de l'incitation (lancement d'appels à projet, soutiens financiers, ...) ou encore fixer des objectifs **d'acquisition de connaissances**. Ces besoins de connaissances sont justement forts concernant la pollution lumineuse.

Toute un ensemble d'actions liées à la lumière artificielle peuvent donc rentrer dans le plan d'action d'un schéma de TVB (qu'il s'agisse du SRCE ou d'un document à une autre échelle telle que celle des PNR), depuis des préconisations de gestion de la lumière dans et en dehors des continuités écologiques jusqu'à la prévision d'efforts de connaissances.

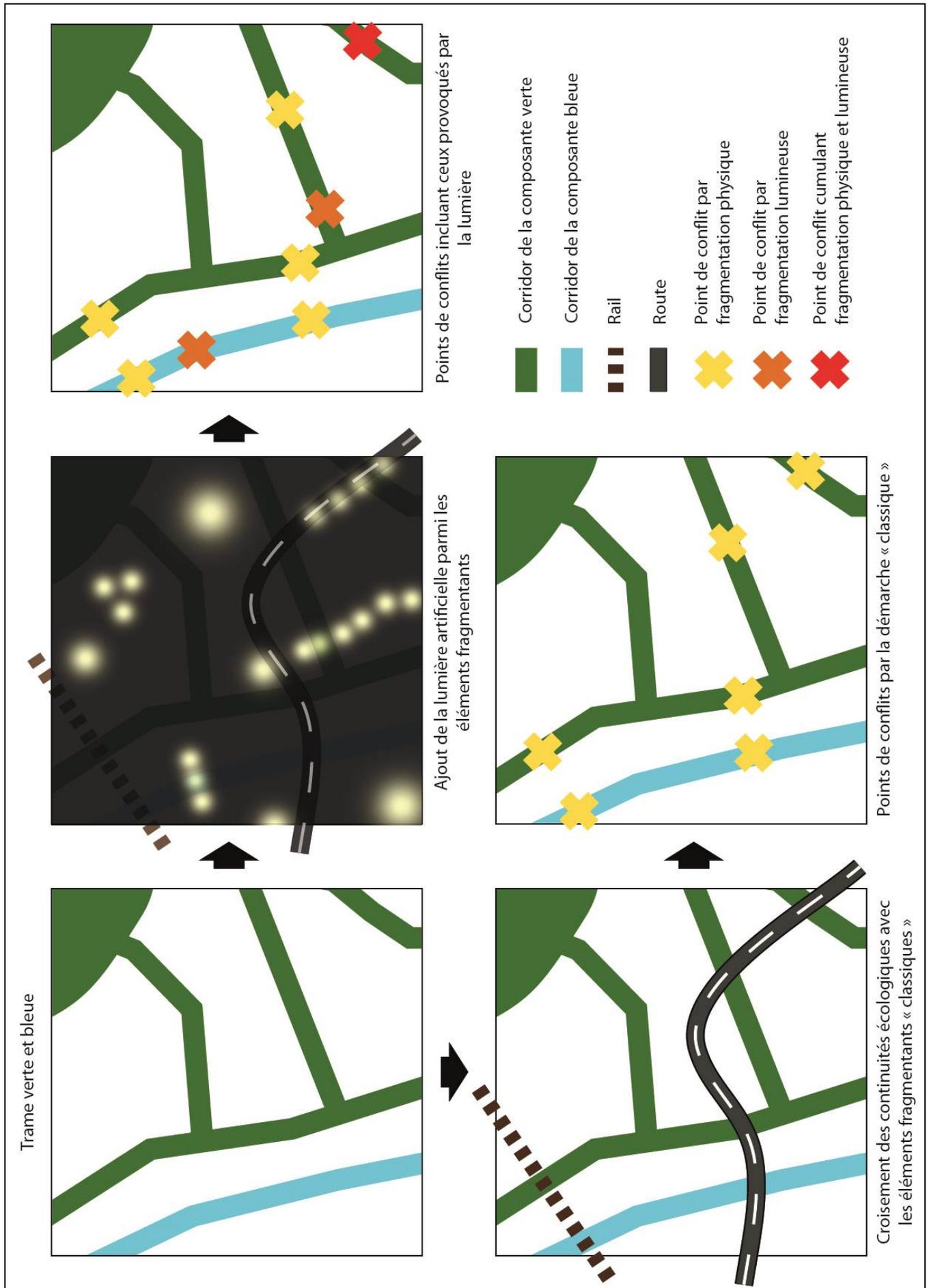


Figure 7 : Illustration de la démarche « 2) Points de conflits ». Crédit : Romain Sordello

> L'objectif de ce rapport - en tant que première étape - est avant tout de réfléchir déjà aux différents moments au fil d'une démarche d'élaboration de TVB où la prise en compte de la lumière artificielle peut intervenir. Par conséquent, son but n'est pas de détailler toutes les actions possibles pouvant apparaître dans un plan d'action. Néanmoins, à titre non exhaustif, quelques paramètres sont fortement mis en avant par la littérature traitée et qu'il est bon de rappeler :

- **l'opportunité d'éclairer** : il est en effet préconisable de limiter la lumière artificielle aux zones où celle-ci est strictement nécessaire et également aux moments où elle l'est. A ce titre, le maintien de zones non éclairées, le retrait de points lumineux ou l'extinction totale à certaines heures sont les mesures les plus efficaces d'un point de vue écologique (Gaston *et al.*, 2012),

- **la direction de la lumière** : lorsqu'un point lumineux est maintenu, il est important d'éviter au maximum que la lumière qu'il diffuse ne dépasse la zone que l'on souhaite éclairer et notamment qu'elle ne s'étale sur les espaces naturels adjacents car cela augmente énormément l'effet barrière et la perte d'habitat pour les espèces lucifuges (Rich & Longcore, 2006). Concrètement, il s'agit ainsi de cibler spatialement le flux lumineux et de diminuer aussi la variable appelée ULOR, c'est-à-dire la part de lumière renvoyée au-dessus de l'horizontal (qui n'est pas simplement déterminée par le luminaire lui-même mais également par le choix du revêtement au sol par exemple),

- **la/les longueur(s) d'onde de la lumière utilisée** : une attention particulière est à apporter aux LEDs qui sont efficaces d'un point de vue énergétique (économie de flux, durée de vie de la lampe, ...) mais émettent dans le bleu et les ultra-violets car ce sont des lampes blanches à large spectre. Or, ces longueurs d'ondes semblent influencer le plus la réponse attraction/répulsion, chez les insectes notamment (Pawson 2014). Les LED bleues sont par ailleurs suspectées d'avoir des conséquences sur la santé humaine (MASSDF, 2014). Cette question du choix de la meilleure longueur d'onde est complexe car chaque espèce ou groupe d'espèce possède sa préférence de longueur d'onde. Globalement, il apparaît qu'il serait favorable pour la biodiversité d'utiliser des ampoules à spectre étroit, qui émettent plutôt dans l'ambre que dans le blanc (Davies, 2013),

- **l'intensité lumineuse** : Lacoeyuilh *et al.* (2014) montrent par exemple le bénéfice pour certaines chauves-souris de maintenir des luminaires à des niveaux d'éclairage faibles. Nous avons vu aussi à maintes reprises dans ce rapport à quel point le niveau d'éclairage naturel de la nuit déjà joue sur le comportement de déplacement pour certaines espèces, dans une sensibilité qui est donc très subtile (variations des phases lunaires). Cette question du seuil à partir duquel la luminosité dépasse ce qui est tolérable pour une espèce est fondamentale. Gaston *et al.* (2013) référencent différents seuils d'éclairage (en Lux) à partir desquels des effets biologiques ont été constatés pour différents taxons mais cette quantification reste encore méconnue pour une grande partie des espèces.

Rappelons que la Trame verte et bleue a prioritairement pour objectif de réduire le phénomène de fragmentation mais que d'une manière générale elle vise aussi à **préserver et restaurer des surfaces d'habitats**. L'intégration de mesures de réduction de la pollution lumineuse dans les plans d'action, notamment en travaillant sur ces quatre paramètres, est donc importante pour réduire la pollution lumineuse, que celle-ci occasionne ou non un phénomène de coupure en plus de dégrader l'habitat.

II.4. Recul sur les trois approches présentées

Pour les trois approches présentées précédemment, proposant chacune de prendre en compte la pollution lumineuse à 3 étapes différentes d'élaboration d'un schéma de TVB (1. Identification des éléments de TVB / 2. Points de conflits / 3. Plans d'action), les deux tableaux 1 et 2 qui suivent :

- proposent un bilan atouts/faiblesses de chacune d'entre elles par rapport à l'objectif que l'on peut leur attribuer en commun de réduire les nuisances lumineuses,
- listent les besoins et limites les plus évidents en termes de connaissances pour chacune des trois approches.

Insistons sur le fait que ces trois approches ne sont pas exclusives et sont mêmes complémentaires.

	Atouts	Faiblesses
1	<p>Permet d'identifier une TVB qui ne comporte pas de blocage dus à la lumière puisque la méthode ne retient que les zones favorables au flux du vivant en considérant entre autres la lumière (ce qui ne signifie pas nécessairement des zones totalement noires => notion de seuil).</p>	<p>En conséquence, cette méthode classe sans doute d'emblée dans la catégorie « matrice » une grande part d'espaces qui pourraient pour certains peut-être redevenir favorables sans grandes difficultés, par une action de gestion (extinction par exemple). La notion de « matrice » est à comprendre comme « tout ce qui n'est pas des continuités écologiques » ; en écologie du paysage la matrice correspond au « reste » c'est-à-dire ce qui n'est ni des noyaux d'habitats ni des corridors. Sur un plan juridique, la matrice n'a pas le même poids que les réservoirs et les corridors qui constituent les continuités écologiques au sens du décret relatif à la Trame verte et bleue.</p> <p>Par ailleurs, ces espaces exclus des continuités écologiques du fait de la présence de lumière artificielle sont peut-être favorables pour la faune le jour et auraient donc à ce titre pertinence à être conservés dans le réseau. Cette méthode demande donc l'ajout de nouvelles sous-sous-trames, qui ne doivent pas venir en remplacement, de manière à ne pas exclure des éléments de TVB pertinents pour la faune diurne.</p>
2	<p>Permet d'identifier des blocages forts liés à la lumière et éventuellement de hiérarchiser les points de conflits à résorber entre ceux qui sont dus à la fragmentation physique, lumineuse et ceux qui cumulent les deux.</p> <p>A noter que si l'étape 1 a été réalisée, il n'existe a priori pas de points de conflits entre les continuités écologiques et la lumière artificielle puisque celle-ci est devenue un critère pour l'identification des éléments de trame. Cette étape peut néanmoins venir en confirmation et permettre de discriminer les éléments « à préserver » de ceux qui doivent être « à restaurer ».</p>	<p>Pas de faiblesse a priori, cette méthode se présente comme une étape pivot entre l'identification des continuités écologiques et le plan d'action.</p>
3	<p>Développe des actions spécifiques sur la lumière artificielle.</p> <p>Méthode la plus susceptible d'aboutir à une réduction de la lumière artificielle puisqu'elle ne la prend pas comme un postulat avec lequel composer mais comme une variable à diminuer.</p> <p>La TVB visant aussi une préservation/restauration de surfaces d'habitats favorables, en plus de lutter spécifiquement contre la fragmentation, le plan d'action est également l'occasion de préconiser des mesures génériques de réduction de pollution lumineuse.</p>	<p>L'efficacité dépend ici totalement de la mise en œuvre effective du plan d'action. Dans le cas des SRCE, le plan d'action stratégique n'a pas vocation à « interdire » » ni « imposer de », il est incitatif et formule des recommandations.</p> <p>Par ailleurs, le plan d'action peut avoir tendance à se focaliser sur la réduction de la lumière artificielle au sein même des continuités écologiques une fois identifiées. Potentiellement il risque donc de délaissier l'ensemble des autres espaces (matrice) où des actions de réduction peuvent être nécessaires aussi. Pour une efficacité maximale, il est donc conseillé que le plan d'action prévoit des mesures, si besoin d'ampleur variable, à la fois à l'intérieur et à l'extérieur des continuités écologiques.</p>

Tableau 1 : Atouts/Faiblesses de la prise en compte de la lumière artificielle à chacune des trois étapes d'élaboration d'un schéma de TVB

	Besoins	Limites
1	<p><u>Pour les réservoirs :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Disposer d'une cartographie de la lumière artificielle - Savoir quelles espèces sont indicatrices d'une bonne qualité nocturne et disposer de données de répartition pour ces espèces <p><u>Pour les corridors :</u></p> <p><i>Chemin de moindre coût</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Connaître assez précisément le niveau d'éclairage/pollution supporté par l'espèce pour laquelle on fera ensuite tourner le modèle de moindre coût, afin d'attribuer de manière juste les coefficients de rugosité - Disposer de cartographies de pollution lumineuse d'échelle suffisante pour ajouter ces critères aux critères physiques d'occupation du sol utilisés jusqu'ici. <p><i>Dilatation/Erosion</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Connaître la distance maximale de tolérance d'une espèce vis-à-vis de la lumière artificielle <p>Globalement, cette démarche nécessite donc :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 - D'avoir de la connaissance fondamentale sur les exigences des espèces vis-à-vis de la lumière artificielle et plus généralement sur leur cycle biologique. 2 - De disposer de données cartographiques sur la lumière artificielle. 	<p>La notion de seuil est fondamentale. Dans cette approche, elle intervient à la fois pour les réservoirs et pour l'identification des corridors. Par exemple, pour l'attribution des coefficients de rugosité pour les chemins de moindre coût, il est nécessaire de savoir à partir de quand (où/quoi) la lumière est effectivement un frein : quelle intensité lumineuse, quelle longueur d'onde, quelle distance par rapport à un point lumineux (ex : un poste d'occupation du sol non éclairé peut subir une pollution d'un poste voisin éclairé).</p> <p>Un travail pour identifier des espèces indicatrices est primordial afin de mesurer ensuite la qualité nocturne par rapport à la présence de telle ou telle espèce (réservoir), d'attribuer les coefficients de rugosité (chemins de moindre coût) ou de définir la distance de tolérance maximale (tampon de dilatation/érosion). Il est nécessaire d'identifier des espèces indicatrices d'une bonne qualité nocturne pour différents types de milieux afin de pouvoir effectuer l'exercice pour les différentes sous-trames d'une trame verte et bleue (notamment les 5 sous-trames stipulées par le décret relatif à la TVB). D'ores et déjà, il s'avère que la connaissance scientifique est très inégale selon les espèces.</p> <p>Une proposition pourrait être de raisonner par cortège fonctionnel temporel en identifiant préalablement des « patterns » d'espèces pour retenir des espèces indicatrices, à la manière de ce qui est fait pour les exigences « milieux ». Par exemple : espèces crépusculaires, espèces totalement nocturnes, espèces lucifuges strictes, sensibilités par longueurs d'ondes, ...</p>
2	<p>Cette étape nécessite :</p> <ul style="list-style-type: none"> - d'avoir préalablement identifié des continuités écologiques (avec ou sans prise en compte de la lumière ; si c'est « avec » cette étape 2 perd de son intérêt mais peut venir en confirmation de l'étape 1 - de disposer d'une cartographie de la lumière artificielle 	<p>Là encore, cette cartographie ne doit pas se limiter à la répartition des points lumineux ce qui serait une simplification forte du sujet, mais exposer réellement une « pollution » en intégrant donc les distances de nuisances autour des points lumineux en fonction de leurs caractéristiques (hauteur de mât, intensité, longueur d'ondes, direction du faisceau lumineux, ...).</p>
3	<p>Pas de préalable requis particulier (au sens de données) puisque cette approche est tournée directement vers l'action après l'identification des continuités écologiques.</p> <p>Ces actions nécessitent en revanche des références en termes de connaissance fondamentale, de retours d'expériences et d'évaluation de l'efficacité de telle ou telle mesure (choix des longueurs d'ondes en fonction des espèces, seuil minimal d'éclairage toléré, efficacité de l'abaissement des intensités, ...).</p>	<p>Cette approche 3) implique, beaucoup plus que les deux autres, des interactions avec les problématiques autres que la biodiversité. En effet, c'est la manière la plus à même d'agir sur l'état de la pollution lumineuse. La mesure la plus efficace en ce sens d'un point de vue écologique (et économique) est par définition l'extinction totale des lumières. En revanche, la nécessité de prendre en compte d'autres besoins (humains), amènera logiquement à des mesures plus nuancées selon les endroits et les moments.</p>

Tableau 2 : Besoins et limites actuelles en termes de connaissances pour la prise en compte de la lumière artificielle à chacune des trois étapes d'élaboration d'un schéma de TVB

III. CONCLUSION

Ce rapport avait pour premier objectif d'aider à se rendre compte dans quelle mesure la lumière artificielle répond ou non aux caractéristiques que présentent les sources « traditionnelles » de fragmentation. Il ressort ainsi de sa première partie, illustrée par plusieurs cas concrets, que l'éclairage nocturne possède effectivement les conséquences communément associées au phénomène de coupure : modification du comportement de mobilité, mortalité directe par collision, isolement/infranchissabilité. La connaissance reste néanmoins lacunaire sur ce dernier aspect difficile à mettre en évidence du fait du caractère connexe de cette pollution à l'urbanisation au sens large. Les résultats de thèses et travaux de recherches en cours et à lancer devraient permettre dans les années à venir de compléter ces manques. Par ailleurs, ce rapport ne visait pas l'exhaustivité des publications mais un premier état des lieux destiné à confirmer la pertinence de considérer un effet barrière par la lumière artificielle. Il pourrait donc être poursuivi par un exercice approfondi d'analyse de la littérature scientifique complète, pour chacune des trois entrées de la grille de lecture proposée dans ce rapport.

Dans la seconde partie de ce rapport, des propositions sont formulées pour aider les acteurs d'ores et déjà à intégrer l'enjeu obscurité/lumière artificielle aux différentes étapes de l'élaboration d'un schéma de Trame verte et bleue. Cette partie montre ainsi que, d'un point de vue théorique, l'enjeu pollution lumineuse peut être pris en compte lors de la phase d'identification des éléments de TVB, lors de l'étape de recensement des points de conflits ou encore dans les plans d'action. Ces trois approches présentent chacune des atouts et des faiblesses, ce qui souligne l'intérêt de les associer. Par contre, elles nécessitent des « in-put » (données, connaissances) qui ne peuvent pas encore tous être alimentés à ce jour. Il est donc important d'activer sur ces sujets une dynamique à la fois de recherche (seuils, longueurs d'ondes, ...) et d'ingénierie (cartographie notamment).

Enfin, toutes ces propositions sont des premières pistes issues d'un travail exploratoire qu'il conviendra d'approfondir notamment au regard des démarches concrètes d'identification de réseaux écologiques qui serviront de retours d'expériences. Le suivi effectué par le Centre de ressources Trame verte et bleue sur l'avancée technique des SRCE y participera pour ce qui relève du niveau régional. Il est également nécessaire d'être attentif aux actions développées à l'échelle plus locale, notamment par les parcs naturels régionaux ou dans les plans locaux d'urbanisme. Un travail pourrait aussi être réalisé afin de lister plus précisément les actions immédiatement opérationnelles et leur cout/bénéfice pour constituer une boîte à outils sur la base de retours d'expériences de terrain et de publications scientifiques.

IV. BIBLIOGRAPHIE ET ICONOGRAPHIE

IV.1. Publications citées

- AGER A.-A., JOHNSON B.-K., KERN J.-W. & KIE J.-G. (2003). Daily and seasonal movements and habitat use by female Rocky mountain elk and Mule deer. *Journal of mammalogy*. Volume 84. Numéro 3. Pages 1076-1088.
- ALBERS S. & DURISCOE D. (2001). Modeling light pollution from population data and implications for National Park Service lands. *George Wright Forum*. Numéro 18. Pages 56-68.
- ALLEMA A.B., ROSSING W.A.H., VAN DER WERF W., HEUSINKVELD B.G., BUKOVINSZKY T., STEINGRÖVER E. & VAN LENTEREN J.C. (2012). Effect of light quality on movement of *Pterostichus melanarius* (Coleoptera: Carabidae). *Journal of Applied Entomology*. Volume 136. Numéro 10. Pages 793–800.
- ARLETTAZ R., GODAT S. & MEYER H (2000). Competition for food by expanding pipistrelle bat populations (*Pipistrellus pipistrellus*) might contribute to the decline of lesser horseshoe bats (*Rhinolophus hipposideros*). *Biological conservation*. Numéro 93. Pages 55-60.
- BAGHLI A., MOES M. & WALZBERG C. (2007). Les corridors faunistiques du cerf (*Cervus elaphus*) au Luxembourg. *Bulletin de la Société des naturalistes luxembourgeois*. Numéro 108. Pages 63-80.
- AKER B.J. & RICHARDSON J.M.L. (2006). The effect of artificial light on male breeding-season behaviour in green frogs, *Rana clamitans melatona*. *Canadian Journal of Zoologie*. Numéro 84. Pages 1528-1532.
- BAUR B. & al (2004). *La biodiversité en Suisse. Etat, sauvegarde, perspectives*. Haupt Verlag.
- BEAUDOIN L. (1985). Le comportement des animaux en présence de sources lumineuses (théorie de l'éclairage directionnel). *Cahier de liaison de l'OPIE*. Volume 19. Numéro 3-4. Pages 25-41.
- BEIER (1995). Dispersal of Juvenile Cougars in Fragmented Habitat. *The Journal of Wildlife Management*. Volume 59. Numéro 2. Pages 228-237.
- BETZ J.T. (1961). *Eclairage public et faune des Hétérocères*. *Alexanor*. Numéro 2. Pages 51-54.
- BLAB J., RUCKSTUHL T., ESCHE T., HOLZBERGER R. & LUQUET G.Ch. (1988). *Sauvons les papillons. Les connaître pour mieux les protéger*. Éditions Duculot, Gembloux (Belgique) et Paris. 192 pages.
- BOLDOGH S., DOBROSI D. & SAMU P. (2007). The effects of the illumination of buildings on house-dwelling bats and its conservation consequences. *Acta chiropterologica*. Volume 9. Numéro 2. Pages 527-534.
- BRUDERER B. (2002). *Störung nächtlich ziehender Vögel durch künstliche Lichtquellen*. Station ornithologique Suisse. Sempach.
- BRUDERER B., PETER D. & STEURI T. (1999). Behaviour of migrating birds exposed to X-band radar and a bright light beam. *Journal of Experimental Biology*. Numéro 202. Pages 1015-1022.
- BRUSSEAU G. (1991). *Éclairages publics et protection des Lépidoptères nocturnes*. *Alexanor*. Numéro 17. Pages 195-197.
- BURKE C., DAVOREN G., MONTEVECCHI W. & WIESE F. (2005). *Seasonal and spatial trends of marine birds along offshore support vessel transects and at oil platforms on the Grand Banks*. In: ARMSWORTHY S., CRANFORD P. & LEE K., editors. *Offshore Oil and Gas Environmental Effects Monitoring: Approaches and Technologies*. Columbus, Battelle Press. Pages 587-614.

- CLARKE J.A. (1983). Moonlight's influence on predator/prey interactions between short-eared owls (*Asio flammeus*) and deermice (*Peromyscus maniculatus*). *Behavioral Ecology and Sociobiology*. Volume 13. Numéro 3. Pages 205-209.
- CLARKE J.A., CHOPKO J.T. & MACKESSY S.P. (1996). The Effect of Moonlight on Activity Patterns of Adult and Juvenile Prairie Rattlesnakes (*Crotalus viridis viridis*). *Journal of Herpetology*. Volume 30. Numéro 2. Pages 192-197.
- DACKE M., BAIRD E., BYRNE M., SCHOLTZ C.H. & WARRANT E.J. (2013). Dung Beetles Use the Milky Way for Orientation. *Current Biology*. Volume 23. Numéro 4. Pages 298–300.
- DAVIES T.W., BENNIE J. & GASTON K.J. (2012). Street lighting changes the composition of invertebrate communities. *Biology letters*. 4 pages.
- DAVIES T.W., BENNIE J., INGER R., HEMPEL DE IBARRA N. & GASTON K.J. (2013). Artificial light pollution: are shifting spectral signatures changing the balance of species interactions?. *Global change biology*. Numéro 19. Pages 1417-1423.
- DECANDIDO R. & ALLEN D. (2006). Nocturnal hunting by peregrine falcons at the Empire State Building, New York City. *The Wilson Journal of Ornithology*. Volumes 118. Numéro 1. Pages 53-58.
- EISENBEIS G. (2006). *Artificial night lighting and insects: attraction of insects to streetlamps in a rural setting in germany*. In: RICH C. & LONGCORE T., editors. *Ecological consequences of artificial night lighting*. Island Press. Washington D.C. Pages 281-304.
- EISENBEIS G. & HASSEL F. (2000). Attraction of nocturnal insects to street lights : a study of municipal lighting systems in a rural area of Rheinhessen (Germany). *Natur und Landschaft*. Numéro 75. Pages 145-156.
- FALKENBERG J.C. & CLARKE J.A. (1998). Microhabitat use of deer mice: effects of interspecific interaction risks. *Journal of Mammalogy*. Volume 79. Numéro 2. Pages 558-565.
- GARBER S.D. (1978). Opportunistic feeding behaviour of *Anolis cristatellus* Iguanidae: Reptilia in Puerto Rico. *Transactions of the Kansas Academy of Science*. Numéro 811. Pages 79-80.
- GASTON K.J., DUFFY J.P., GASTON S., BENNIE J. & DAVIES T.W. (2014). Human alteration of natural light cycles: causes and ecological consequences. *Oecologia*. Volume 176. Numéro 4. Pages 917–931.
- GASTON K.J., BENNIE J., DAVIES T.W. & HOPKINS J. (2013). The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. *Biological Reviews*. Volume 88. Numéro 4. Pages 912–927.
- GASTON K.J., DAVIES T.W., BENNIE J. & HOPKINS J. (2012). Reducing the ecological consequences of night-time light pollution: options and developments. *Journal of applied ecology*. Numéro 49. Pages 1256-1266.
- GEORGII B. (1981). Activity patterns of female Red deer (*Cervus elaphus* L.) in the Alps. *Oecologia*. Numéro 49. Pages 127-136.
- GEORGII B. (1980). Home range patterns of female Red deer (*Cervus elaphus* L.) in the Alps. *Oecologia*. Numéro 47. Pages 278-285.
- GIGLEUX M. & DE BILLY V. (2013). *Petits ouvrages hydrauliques et continuités écologiques Cas de la faune piscicole*. CETE de l'Est & ONEMA. 25 pages.
- GRANIER H. (2012). *Comment prendre en compte la pollution lumineuse dans l'identification des continuités écologiques ?*. Université Paris Diderot. Application au territoire du Parc naturel régional des Causses du Quercy. 188 pages.

- GUINARD E. & PINEAU C. (2006). *Mesures de limitation de la mortalité de la Chouette effraie sur le réseau routier*. Service d'études techniques des routes et autoroutes (SETRA). 11 pages.
- HERNANDEZ M. (1988). Road mortality of the little owl (*Athene noctua*) in Spain. *Journal of raptor research*. Volume 22. Numéro 3. Pages 81-84.
- HOLKER F., MOSS T., GRIEFAHN B., KLOAS W. & VOIGT C.C. (2010a). The Dark Side of Light: A Transdisciplinary Research Agenda for Light Pollution Policy. *Ecology and society*. Volume 15. Numéro 4.
- HOLKER F., WOLTER C., PERKIN E.K. & TOCKNER K. (2010b). Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in Ecology & Evolution*. Volume 25. Numéro 12. Pages 681–682.
- IMBER M. (1975). Behavior of petrels in relation to the moon and artificial lights. *Notornis*. Numéro 22. Pages 302-306.
- KEMPENAERS B., BORGSTRÖM P., LOËS P., SCHLICHT E. & VALCU M. (2010). Artificial Night Lighting Affects Dawn Song, Extra-Pair Siring Success, and Lay Date in Songbirds. *Current Biology*. Volume 20. Numéro 19. Pages 1735–1739.
- KLEVELAND K. (2007). *Seasonal home ranges and migration of red deer (Cervus elaphus) in Norway*. Thèse de Master. Université d'Oslo, Norvège. 42 pages.
- KYBA C.C.M., RUHTZ T., FISCHER J. & HOLKER F. (2011). Cloud coverage acts as an amplifier for ecological light pollution in urban ecosystems. *PLoS ONE*. Volume 6. Numéro 3: e17307. 9 pages.
- 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*. Volume 9. Numéro 10, e103042. Pages 1-8.
- LANGEVELDE V.F., ETTEMA J.A., DONNERS M., WALLISDEVRIES M.F. & GROENENDIJK D. (2011). Effect of spectral composition of artificial light on the attraction of moths. *Biological conservation*. Numéro 144. Pages 2274-2281.
- LE CORRE M., OLLIVER A., RIBES S. & JOUVENTIN P. (2002). Light-induced mortality of petrels : a 4-year study from Réunion Island (Indian Ocean). *Biological Conservation*. Numéro 105. Pages 93-102.
- LE TALLEC T., PERRET M. & THÉRY M. (2013). Light Pollution Modifies the Expression of Daily Rhythms and Behavior Patterns in a Nocturnal Primate. *PLOS One*. Volume 8. Numéro 11. e79250.
- LEWANZIK D. & VOIGT C.C. (2014). Artificial light puts ecosystem services of frugivorous bats at risk. *Journal of applied ecology*. Volume 51. Numéro 2. Pages 388–394.
- LHONORE J.E. (1987). De l'incidence des éclairages urbains sur les populations de Lépidoptères in RICOUNICHOLAS M. (2001). Light Pollution and Marine Turtle Hatchlings: The Straw that Breaks the Camel's Back ? *Protecting Dark Skies*. Volume 18. Numéro 4. Pages 77-82.
- LYYTIMÄKI J. (2013). Nature's nocturnal services: Light pollution as a non-recognised challenge for ecosystem services research and management. *Ecosystem Services*. Volume 3. Pages e44–e48.
- MACNEALE K.H., PECKARSKY B.L. & LIKENS G.E. (2005). Stable isotopes identify dispersal patterns of stonefly populations living along stream corridors. *Freshwater Biology*. Numéro 50. Pages 1117-1130.
- MALNAS K., POLYAK L., PRILL E., HEGEDUS R., KRISKA G., DEVAI G., HORVATH G. & LENGYEL S. (2011). Bridges as optical barriers and population disruptors for the mayfly *Palingenia longicauda*: an overlooked threat to freshwater biodiversity?. *Journal Insect Conservation*. Numéro 15. Pages 823-832.

MASSDF - MINISTÈRE DES AFFAIRES SOCIALES, DE LA SANTÉ ET DES DROITS DES FEMMES (2014). *Santé-Environnement. 3ème plan national 2015 > 2019*. 106 pages.

MONTEVECCHI W.A. (2006). Influences of artificial light on marine birds. *In: RICH C. & LONGCORE T., editors. Ecological consequences of artificial night lighting*. Island Press. Washington D.C. Pages 94-113.

MOORE M.V., PIERCE S.M., WASH H.M., KWALVIK S.K. & LIM J.D. (2000). Urban light pollution alters the diel vertical migration of *Daphnia*. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*. Numéro 27. Pages 1-4.

MORELLI F., BEIM M., JERZAK L., JONES D. & TRYJANOWSKI P. (2014). Can roads, railways and related structures have positive effects on birds? – A review. *Transportation Research*. Volume 30D. Pages 21–31.

NICHOLAS M. (2001). Light Pollution and Marine Turtle Hatchlings : The Straw that Breaks the Camel's Back ?. *Protecting Dark Skies*. Volume 18. Numéro 4. Pages 77-82.

NOWICKI F., DADU L., CARSIGNOL J., BRETAUD J.F. & BIELSA S. (2009). *Chiroptères et infrastructures de transports terrestres. Mesures et actions de préservation*. SETRA – CETE de l'Est – CETE Normandie-Centre. 22 pages.

PAWSON S.M. & BADER M.K.F. (2014). LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature. *Ecological applications*. Volume 24. Numéro 7. Pages 1561–1568.

PÉPIN D., ADRADOS C., JANEAU G., JOACHIM J. & MANN C. (2008). Individual variation in migratory and exploratory movements and habitat use by adult Red deer (*Cervus elaphus* L.) in a mountainous temperate forest. *Ecological research*. Numéro 23. Pages 1005-1013.

PERKIN E.K., HOLKER F., RICHARDSON J.S., SADLER J.P., WOLTER C. & TOCKNER K. (2011). The influence of artificial light on stream and riparian ecosystems: questions, challenges, and perspectives. *Ecosphere*. Volume 2. Numéro 11. Article 122. 16 pages.

PICCHI M.S., AVOLIO L., AZZANI A., BROMBIN O. & CAMERINI G. (2013). Fireflies and land use in an urban landscape: the case of *Luciola italica* L. (*Coleoptera: Lampyridae*) in the city of Turin. *Journal of Insect Conservation*. Volume 17. Numéro 4. Pages 797-805.

POLAK T., KORINE C., YAIR S. & HOLDERIED M.W. (2011). Differential effects of artificial lighting on flight and foraging behaviour of two sympatric bat species in a desert. *Journal of zoology*. Volume 285. Numéro 1. Pages 21–27.

RICH C. & LONGCORE T. (2006). *Ecological consequences of artificial night lighting*. Island Press, Washington, D.C., USA. 458 pages.

RILEY W.D., DAVISON P.I., MAXWELL D.L. & BENDALL B. (2013). Street lighting delays and disrupts the dispersal of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fry. *Biological conservation*. Volume 158. Pages 140–146.

SALMON M. (2003). Artificial night lighting and sea turtles. *Biologist*. Numéro 50. Pages 163-168.

SIBLET J.P. (2008). *Impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité*. Synthèse bibliographique. Muséum national d'Histoire naturelle. 30 pages.

SORDELLO R. (2013a). *Effet fragmentant de la lumière et impacts sur le déplacement des espèces*. Muséum national d'Histoire naturelle. Présentation lors de la journée d'échanges du Centre de ressources TVB.

SORDELLO R. (2013b). Synthèse bibliographique sur les traits de vie du Grand rhinolophe (*Rhinolophus ferrumequinum* (Schreber, 1774)) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques. Muséum national d'Histoire naturelle. 18 pages.

- SORDELLO R. (2011). *Six propositions pour réduire les nuisances lumineuses sur la biodiversité dans les espaces naturels*. Muséum national d'Histoire naturelle. 12 pages.
- STONE E.-L, JONES G. & HARRIS S. (2009). Street lighting disturbs commuting bats. *Current biology*. Numéro 19. Pages 1123-1127.
- STONE E.L, JONES G. & HARRIS S. (2012). Conserving energy at a cost to biodiversity? Impacts of LED lighting on bats. *Global Change Biology*. Numéro 18. Pages 2458-2465.
- TABOR R.A., BROWN G.S. & LUITING V.T. (2004). The Effect of Light Intensity on Sockeye Salmon Fry Migratory Behavior and Predation by Cottids in the Cedar River, Washington. *North American Journal of Fisheries Management*. Volume 24. Numéro 1. Pages 128-145.
- TEYSSÈDRE A. (1996). *L'orientation des animaux – Méthodes et mécanismes*. Éditions Nathan. 234 pages.
- THRELFALL C.G., LAW B. & BANKS P.B. (2013). The urban matrix and artificial light restricts the nightly ranging behaviour of Gould's long-eared bat (*Nyctophilus gouldi*). *Austral Ecology*. Volume 38. Numéro 8. Pages 921–930.
- TRAPP J.L. (1998). *Bird kills at towers and other man-made structures : an annotated partial bibliography (1960-1998)*. U.S. Fish and Wildlife Service. Office of Migratory Bird Management. 18 pages.
- TUXBURY S.M. & SALMON M. (2005). Competitive interactions between artificial lighting and natural cues during seafind by hatchling marine turtles. *Biological Conservation*. Volume 121. Numéro 2. Pages 311-316.
- WARRANT E. (2004). Vision in the dimmest habitats on Earth. *Journal of Comparative Physiology A*. Volume 190. Numéro 10. Pages 765-789.
- WARRANT E.J. & JOHNSEN S. (2013). Vision and the light environment. *Current Biology*. Volume 23. Numéro 22. Pages R990–R994.
- WITHERINGTON B.E (1992). Behavioral responses of nesting sea turtles to artificial lighting. *Herpetologica*. Volume 48. Numéro 1. Pages 31-39.
- WIESE F.K., MONTEVECCHI W.A., DAVOREN G.K., HUETTMANN F., DIAMOND A.W. & LINKE J. (2001). Seabirds at risk around offshore oil platforms in the North-west. *Marine Pollution Bulletin*. Volume 42. Numéro 12. Pages 1285-1290.
- WITHERINGTON B.E (1991). Orientation of hatchling loggerhead turtles at sea off artificially lighted and dark beaches. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. Volume 149. Numéro 1. Pages 1-11.
- YOUNG H.J. (2002). Diurnal and nocturnal pollination of *Silene alba* (*Caryophyllaceae*). *American Journal of Botany*. Volume 89. Numéro 3. Pages 433-440.
- ZOLLNER P.A. & LIMA S.L. (1999). Illumination and the perception of remote habitat patches by white-footed mice. *Ecological applications*. Volume 9. Numéro 3. Pages 489-500.

IV.2. Références juridiques

Décret n° 2014-45 du 20 janvier 2014 portant adoption des orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques

Décret n° 2012-1492 du 27 décembre 2012 relatif à la trame verte et bleue

IV.3. Crédits et sources iconographiques

Figure 1 : Insectes tournoyant sous un projecteur de stade (Charlety, Paris). Crédit : Vincent Vignon

Figure 2 : Petit rhinolophe (*Rhinolophus hipposideros*). Crédit : Philippe Gourdain

Figure 3 : Vue aérienne lors d'un atterrissage de nuit à l'aéroport d'Orly. Figure 2 : Crédit Vincent Vignon

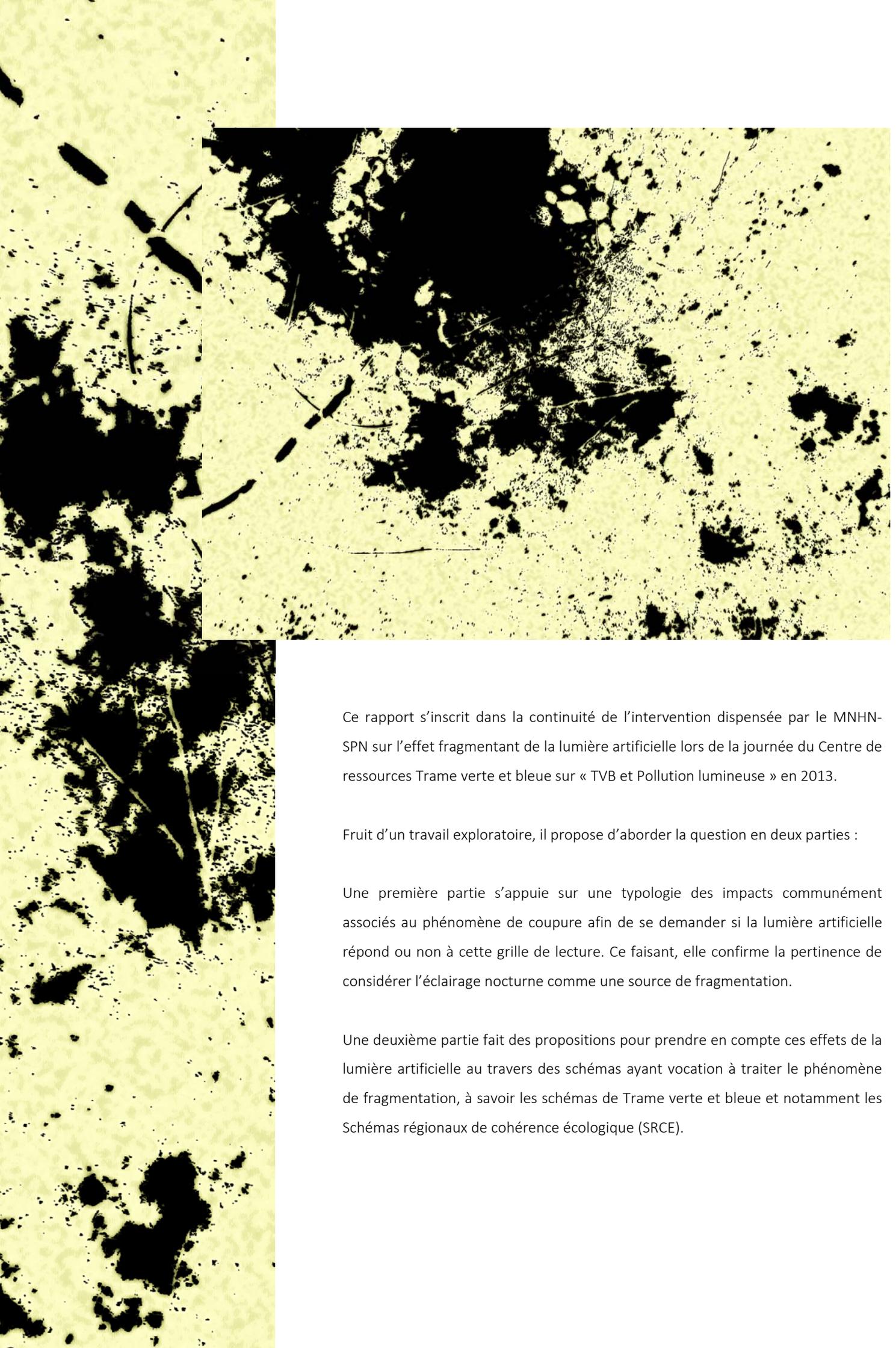
Figure 4 : Concept de chronotone calqué sur celui d'écotone. Crédit : Romain Sordello

Figure 5 : Illustration schématique du principe d'intégration de la lumière artificielle pour la désignation d'un réservoir de biodiversité. Crédit : Romain Sordello

Figure 6 : Méthode du chemin de moindre coût pour l'identification des corridors. Crédit : Romain Sordello

Figure 7 : Illustration de la démarche « 2) Points de conflits ». Crédit : Romain Sordello

Source des images des figures 1 à 4 : NUITFRANCE. *Galerie de photos et images*. Disponible en ligne sur : <http://www.nuitfrance.fr/>. Consulté le 25/11/2014



Ce rapport s'inscrit dans la continuité de l'intervention dispensée par le MNHN-SPN sur l'effet fragmentant de la lumière artificielle lors de la journée du Centre de ressources Trame verte et bleue sur « TVB et Pollution lumineuse » en 2013.

Fruit d'un travail exploratoire, il propose d'aborder la question en deux parties :

Une première partie s'appuie sur une typologie des impacts communément associés au phénomène de coupure afin de se demander si la lumière artificielle répond ou non à cette grille de lecture. Ce faisant, elle confirme la pertinence de considérer l'éclairage nocturne comme une source de fragmentation.

Une deuxième partie fait des propositions pour prendre en compte ces effets de la lumière artificielle au travers des schémas ayant vocation à traiter le phénomène de fragmentation, à savoir les schémas de Trame verte et bleue et notamment les Schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE).