

Pistes méthodologiques pour prendre en compte la pollution lumineuse dans les réseaux écologiques

Romain Sordello

Volume 17, Number 3, December 2017

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1058380ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Sordello, R. (2017). Pistes méthodologiques pour prendre en compte la pollution lumineuse dans les réseaux écologiques. *VertigO*, 17(3).

Article abstract

In response to habitat fragmentation, scientific literature recommends ecological networks, which are natural areas interconnected structurally and functionally. Recently, artificial light at night (ALAN) is recognized as a new cause of habitat fragmentation. Indeed, light pollution modifies animal mobility and degrades quality of habitats used by biodiversity at night. It can be also a real barrier for some species that are not able to cross lighting areas. All those impacts imply that light pollution be integrated into ecological networks but this need raises new questions for practitioners. This article proposes some solutions to planify ecological networks integrating light pollution, from their building to their implementation. ALAN can be covered at different steps of the process : 1) to design a dark ecological network (cores and corridors), 2) to locate conflictual zones between green infrastructure and lightings or even 3) to plan actions to reduce light pollution in the ecological network. This article proposes also first indications about lighting parameters that have to be considered in an ecological network for biodiversity. Indeed, light pollution causes several kinds of problems to biodiversity that have to be translated into quantitative and qualitative variables - and next into maps - for ecological networks. Furthermore, a list of species that are particularly sensitive to ALAN should be provided to determine switching thresholds for ecological networks.

Tous droits réservés © Université du Québec à Montréal et Éditions en environnement VertigO, 2017



This document is protected by copyright law. Use of the services of Érudit (including reproduction) is subject to its terms and conditions, which can be viewed online.

<https://apropos.erudit.org/en/users/policy-on-use/>

This article is disseminated and preserved by Érudit.

Érudit is a non-profit inter-university consortium of the Université de Montréal, Université Laval, and the Université du Québec à Montréal. Its mission is to promote and disseminate research.

<https://www.erudit.org/en/>

Pistes méthodologiques pour prendre en compte la pollution lumineuse dans les réseaux écologiques

Romain Sordello

Introduction

- 1 Depuis des milliards d'années, la Terre connaît une alternance de jour et de nuit et ce phénomène a constitué un paramètre totalement structurant de l'évolution du vivant (Duffy et al., 2015 ; Gerrish et al., 2015 ; Warrant et Johnsen, 2013). Des traits morphologiques, biologiques ou comportementaux permettent ainsi à certaines espèces de vivre, se repérer et communiquer la nuit. Par exemple, certains organismes maximisent la réception de la faible lumière visible émise naturellement par le ciel étoilé (Orlowski et al., 2012 ; Veilleux et al., 2012). D'autres encore exploitent la lumière infrarouge (Van Dyke et Grace, 2010) ou ultraviolette (Cowan et Gries, 2009 ; Losey et al., 1999). Selon Holker (2010), 28 % des vertébrés et 64 % des invertébrés sont en tout ou en partie nocturnes.
- 2 L'Homme, quant à lui, est un animal diurne. Il n'a pas d'autre choix que d'éclairer artificiellement la nuit s'il souhaite y prolonger son activité. Or, l'activité nocturne n'a cessé de prendre de plus en plus de place dans les sociétés modernes (loisirs divers, travail de nuit...) corrélativement à leur urbanisation (Gwiazdzinski, 2002). La lumière artificielle la nuit est aussi souvent perçue comme un facteur de progrès, un gage de sécurité pour les personnes ou encore un vecteur d'esthétique dans la ville. Pour ces différentes raisons, l'éclairage nocturne s'est considérablement déployé à l'échelle planétaire ces dernières décennies (Falchi et al., 2016).
- 3 Dans le même temps, cette émission de lumière artificielle la nuit a des conséquences négatives dans divers domaines. Elle réduit la visibilité du ciel étoilé, elle constitue une

part importante des consommations d'énergie, elle a des effets néfastes sur le sommeil et plus largement sur la santé humaine (ex. : Erren et al., 2016). Elle nuit également à la biodiversité (Siblet, 2008 ; Rich et Longcore, 2006), y compris végétales (Bennie et al., 2016). L'éclairage nocturne est donc à l'origine d'une tension : en dépit d'être un service pour les humains, il génère des nuisances pour eux-mêmes et pour leur environnement (Challéat et Lapostolle, 2015). Le dernier atlas mondial de la pollution lumineuse publié en 2016 par Falchi et al. montre que plus de 80 % de la population mondiale est désormais concernée et cette proportion monte à 99 % en Europe et aux États-Unis.

- 4 En ce qui concerne la biodiversité, la lumière artificielle nocturne perturbe la physiologie et le métabolisme (ex : Durrant et al., 2015), la reproduction (ex : Van Geffen et al., 2015) et les rythmes biologiques des espèces nocturnes comme diurnes (Raap et al., 2015). Elle a des conséquences sur les rapports entre proies et prédateurs (Canario et al., 2012) et sur d'autres relations interspécifiques comme la pollinisation (Knop et al., 2017). En conséquence, elle altère les communautés (ex. : Schoeman, 2015) et est susceptible de menacer les services rendus par les écosystèmes nocturnes (Lyytimaki, 2013). Certains auteurs estiment même que la lumière artificielle nocturne est devenue l'une des pressions de sélection les plus importantes qui s'exercent de nos jours sur la biodiversité (Swaddle et al., 2015 ; Urbanski et al., 2012).
- 5 De manière claire et évidente, la lumière artificielle la nuit perturbe en particulier un phénomène essentiel à la vie : la mobilité. Du fait du pouvoir d'attraction (ex. : Thums et al., 2016) et de répulsion (ex : Stone et al., 2012) de la lumière, les différents paramètres des déplacements de la faune sont modifiés, tels que la fréquence (Baker et Richardson, 2006), les horaires (Riley et al., 2013) ou encore le but (Le Corre et al., 2002 ; Telfer, 1987 ; Imber, 1975). Depuis peu, la pollution lumineuse est également appréhendée à l'échelle du paysage (Marcantonio et al., 2015 ; Kyba et Holker, 2013). Il est ainsi démontré que celle-ci dégrade la qualité des habitats utilisés par la faune nocturne (Picchi et al., 2013 ; Threlfall et al., 2013). L'éclairage artificiel occasionne aussi une fragmentation et un mitage du noir de la nuit (Sordello et al., 2014). Les points lumineux s'additionnent sous l'effet du comportement ondulatoire de la lumière, ce qui crée une infrastructure lumineuse qui sectionne le noir nocturne (fragmentation) et isole des « poches » de noir résiduel (mitage). En 2006, Eisenbeis (*dans* : Rich et Longcore, 2006) a théorisé ce phénomène : les points lumineux constituant chacun un piège écologique pour les insectes nocturnes, par accumulation une route éclairée forme alors une infrastructure lumineuse infranchissable par ces animaux. Ces derniers sont irrémédiablement « aspirés » dans la zone éclairée et ne peuvent en sortir, ils y meurent de collisions, de prédation ou d'épuisement. L'auteur nomme ce phénomène le « *crash barrier effect* » ou « *vaccum effect* ». Si la connaissance reste encore lacunaire sur cet effet fragmentant, les études probantes se multiplient ces dernières années sur des groupes biologiques variés (Van Grunsven et al., 2017 ; Bliss-Ketchum, 2016 ; Beier, 1995).
- 6 En réponse au phénomène de disparition et de fragmentation des habitats, le développement de réseaux écologiques est préconisé par la littérature scientifique (Opdam, 2006 ; Burel et Baudry, 1999). Les réseaux écologiques désignent un maillage de milieux naturels permettant de maintenir un niveau satisfaisant de connectivité paysagère, à la fois structurelle et fonctionnelle (Hepcan et al., 2009). Ils offrent ainsi aux espèces la possibilité d'assurer leurs différents déplacements et garantissent notamment un brassage génétique. Les réseaux écologiques sont devenus de véritables outils de

planification au service de la biodiversité, permettant d'intégrer les enjeux écologiques dans l'aménagement du territoire.

- 7 Dans la mesure où leur objet est la disparition et la fragmentation des habitats sous toutes leurs formes, les réseaux écologiques constituent de fait une approche pertinente pour lutter contre la disparition et la fragmentation des habitats causées par la lumière artificielle. En 2010, Challéat posait les premiers jalons conceptuels d'une trame prenant en compte l'environnement nocturne. Aujourd'hui, il est nécessaire d'aller plus loin sur le plan opérationnel en répondant à la question que se posent les décideurs et les gestionnaires : comment prendre en compte concrètement la pollution lumineuse dans une démarche de réseau écologique ? Il est en effet de plus en plus habituel pour les praticiens des réseaux écologiques de traiter certains éléments fragmentant - tels que les infrastructures linéaires de transport. À l'inverse, l'intégration de la lumière artificielle nocturne dans une telle démarche reste à penser.
- 8 De nombreux pays se sont désormais engagés dans des politiques de réseaux écologiques pour lutter contre la disparition et la fragmentation des habitats (Jongman, 1995). Ces politiques passent alors par l'élaboration de divers schémas de planification matérialisant ces réseaux écologiques en vue de les préserver et les restaurer, généralement à différentes échelles territoriales. En France par exemple, le ministère de l'Écologie pilote depuis 2007 la Trame verte et bleue qui se traduit notamment, à l'échelle régionale, par l'élaboration de Schémas régionaux de cohérence écologique.
- 9 La démarche d'élaboration d'un schéma de réseaux écologiques se déroule le plus souvent selon les étapes suivantes :
 1. Les éléments constituant le réseau écologique sont identifiés,
 2. Les points ou zones de conflits entre les éléments du réseau écologique et les éléments fragmentants sont repérés,
 3. Des actions sont prévues pour préserver ou restaurer le réseau écologique.
- 10 L'objectif de cet article exploratoire est ainsi de proposer dans un premier temps des pistes méthodologiques et des recommandations pour voir si la lumière artificielle nocturne peut être intégrée à ces trois étapes et, le cas échéant, comment. Dans un deuxième temps, ces propositions seront discutées au regard de leurs atouts et faiblesses. Enfin, cet article initie également une réflexion sur les paramètres (métriques) d'éclairage nocturne à considérer et sur le choix d'espèces cibles pour mettre en œuvre ces propositions.

L'étape d'identification des éléments du réseau écologique

- 11 Un réseau écologique est un ensemble de milieux naturels en qualité, taille et nombre suffisants préservés et connectés entre eux (Liu et al., 2015). Selon les démarches, on peut classer ces éléments en deux grands types, les « nœuds » et les « liens » (Dale et Fortin, 2005) :
 - les « nœuds » sont appelés des réservoirs de biodiversité, des zones cœurs, des « patch », des noyaux ou encore des zones nodales. Ils sont composés des milieux les plus préservés et forment des espaces où la biodiversité est la plus riche (Burel et Baudry, 1999). Ils constituent ainsi des populations sources (Gaston et al., 2008). À ce titre, ils reprennent

généralement *a minima* les aires protégées et autres périmètres délimités pour la biodiversité,

- les « liens » sont appelés des corridors écologiques. Ils assurent les différents déplacements (routiniers, dispersion...) entre les nœuds, nécessaires à la faune et la flore (Burel et Baudry, 1999). L'efficacité de ces corridors pour faciliter la mobilité du vivant a été démontrée, aussi bien pour la faune (Sekercioglu, 2009 ; Gillies et Cassidy St. Clair, 2008) que pour la flore (Damschen et al., 2006).

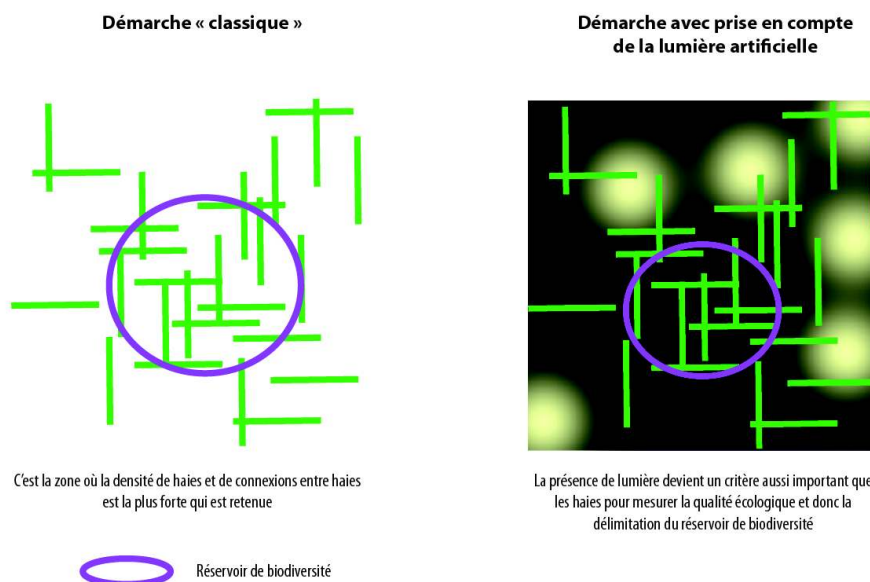
Prendre en compte la lumière artificielle dans la caractérisation des réservoirs de biodiversité

- 12 Les zonages existant pour la biodiversité et en particulier les aires protégées restent pertinents à intégrer dans un réseau écologique d'un point de vue de la protection de l'environnement nocturne. Les aires protégées terrestres sont en effet relativement préservées de la pollution lumineuse (Gaston et al. 2015). De plus, les gestionnaires d'espaces protégés sont moteurs dans le développement d'initiatives pour la protection de la nuit (Lapostolle et al., 2015).
- 13 Depuis une décennie environ, des démarches de labellisation de certains espaces au titre de la qualité de leur ciel nocturne émergent. On peut citer par exemple le label « Réserve internationale de ciel étoilé » (RICE) délivré par l'International Dark Sky Association, qui propose également d'autres types de « zonages » (Parcs, Sanctuaires, cf. [en ligne] URL : <http://www.darksky.org/idsp/> ; IDS, 2015). La première RICE à avoir été créée est celle du Mont-Mégantic au Canada, inaugurée en 2007. Il existe également le label « Starlight Reserve » découlant de la déclaration pour la défense de la Qualité du Ciel Nocturne et le Droit d'Observer les Étoiles adoptée lors de la conférence Starlight sur l'île de La Palma aux Canaries en avril 2007. On peut évoquer encore les « Dark-Sky Site Designations » de la Royal Astronomical Society of Canada (RASC) qui proposent là aussi plusieurs types de sites (les « Dark-Sky Preserves », les « Urban Star Parks », les « Nocturnal Preserves », cf. [en ligne] URL : <https://www.rasc.ca/dark-sky-site-designations>).
- 14 Une question se pose alors : est-il pertinent d'intégrer ces espaces dans un réseau écologique pour la biodiversité ? Peuvent-ils servir de base complémentaire pour la caractérisation des réservoirs de biodiversité d'un réseau écologique ? Il est évident que l'objectif premier de ces labellisations de sites est la qualité de leur ciel nocturne et la visibilité des étoiles (ex. : « *Une Réserve Starlight est un site où un engagement à défendre la qualité du ciel nocturne et l'accès à la lumière des étoiles a été mis en place. Sa fonction principale sera de préserver la qualité du ciel nocturne et de ses valeurs associés, qu'elles soient culturelles, scientifiques, astronomiques, ou les paysages s'y rapportant* », extrait de Valls-Gabaud, 2009). Néanmoins, ces enjeux astronomiques recoupent une partie des enjeux de biodiversité soulevés par l'éclairage nocturne. En effet, l'accès au ciel étoilé est également important pour la faune nocturne, notamment les oiseaux migrateurs (Wiltschko et Wiltschko, 1977), les mammifères marins (Mauck et al., 2008) ou encore certains insectes (ex. : Smolk et al., 2016). Ces animaux utilisent la configuration des étoiles (Mouritsen et Larsen, 2001), la rotation du ciel nocturne (Able et Able, 1990) et aussi spécifiquement la Voie lactée (Dacke et al., 2013) pour se déplacer. Ce recouvrement d'enjeux entre astronomie et biodiversité peut donc justifier théoriquement l'intégration de ces sites dans un réseau écologique. Celle-ci devrait cependant être confirmée au cas par cas. En outre, les enjeux de biodiversité sont bien plus larges et l'impact de la pollution lumineuse sur le vivant ne

peut se résumer à la visibilité ou non des étoiles (brillance du ciel nocturne). À titre d'exemple, les problématiques de lumières intrusives (Downs et al., 2003), du pouvoir attractif des points lumineux (Hauptfleisch et Dalton, 2015), ou encore de niveaux d'éclairement au sol (Zollner et Lima, 1999) sont prégnantes pour la biodiversité alors qu'elles ne concernent pas ou qu'indirectement la vision du ciel étoilé.

- 15 L'intégration de ces « dark sky sites » paraît donc pouvoir être une des sources d'identification des réservoirs de biodiversité d'un réseau écologique, mais cela ne suffit pas. De plus, il faut souligner le recouvrement assez fréquent entre ces sites labellisés pour le ciel nocturne et les espaces protégés pour la biodiversité (réserves naturelles, parcs nationaux). Cela limite au final la plus-value apportée par l'intégration de ces sites labellisés puisque les espaces protégés sont déjà une composante évidente d'un réseau écologique. En France par exemple, une RICE existe autour du Pic du Midi dont la zone cœur s'appuie sur les zonages de protection existants (Parc national des Pyrénées, Réserve naturelle nationale du Néouvielle, Réserve naturelle nationale d'Aulon) (Bourgeois, 2016). D'autres parcs nationaux, réserves naturelles ou parcs naturels régionaux en France ont aussi, à leur tour, entamé une démarche pour demander la labellisation RICE.
- 16 Au-delà de la reprise de zonages d'inventaires ou de protection pré-existants, des réservoirs de biodiversité « complémentaires » peuvent être identifiés. C'est ici que se trouve la réelle innovation : identifier des espaces que la qualité écologique rend candidats au statut de réservoir de biodiversité alors que jusqu'ici ces espaces n'ont pas été reconnus au titre de la biodiversité. En France, le réseau d'espaces « protégés » (pris au sens large de Natura 2000) ne comprend que 12 % du territoire métropolitain (Pageaud et Lévêque, 2012). Il est donc indispensable de compléter cette base de sites protégés par d'autres espaces de qualité afin d'obtenir un réseau écologique suffisamment dense en noyaux. La littérature scientifique et l'expérience montrent que 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...) (Sordello et al., 2017 ; Khan et al., 2016 ; Culmsee et al., 2014). Dans ce processus, les données d'éclairage nocturne pourraient donc être utilisées pour compléter 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 1). Cet article reviendra plus loin sur cette mesure de l'obscurité et sur le choix des espèces en donnant de premiers éléments de réflexion.

Figure 1. Illustration schématique du principe d'intégration de la lumière artificielle pour la désignation d'un noyau (réservoir) de biodiversité.



Prendre en compte la lumière artificielle dans la caractérisation des corridors

- 17 La protection de la nature a débuté par la délimitation de zonages, à travers notamment les parcs nationaux, considérés initialement comme des espaces où la nature était mise sous cloche. La compréhension du vivant et de ses dynamiques spatiale et temporelle a peu à peu mis en évidence la nécessité d'aller vers une mise en réseau de ces zonages, par l'intermédiaire d'un maillage permettant la circulation de la faune et de la flore. La nouveauté apportée par les réseaux écologiques se trouve donc véritablement dans leurs corridors, qui constituent des milieux jointifs entre les réservoirs de biodiversité. Dans le même temps, l'identification de corridors est plus complexe que celle de réservoirs, car elle fait intervenir des notions de linéaires, de direction, de continuité voire de contiguïté des milieux naturels. La recherche et l'ingénierie ont alors mis en place diverses méthodes pour identifier des corridors.
- 18 Les méthodes les plus utilisées sont basées sur la perméabilité des milieux, comme celle dite des « chemins de moindre coût » (« least cost path ») (ex : Li et al., 2010). Cette méthode nécessite la constitution préalable d'une « carte de friction » (aussi appelée « carte 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 (Graves et al., 2014 ; Zeller et al., 2012). Les corridors résultent alors des chemins les moins contraignants pour le déplacement du vivant permettant de relier entre eux les réservoirs de biodiversité (zones nodales) sur la base de cette carte de friction. La lumière artificielle peut donc être intégrée comme un critère supplémentaire pour l'attribution des coefficients de rugosité de la carte préalable. Concrètement, une maille éclairée de nuit correspond à un coefficient de friction plus fort qu'une maille non éclairée du même type d'occupation du sol, pour une espèce lucifuge. Cette démarche a été mise en pratique

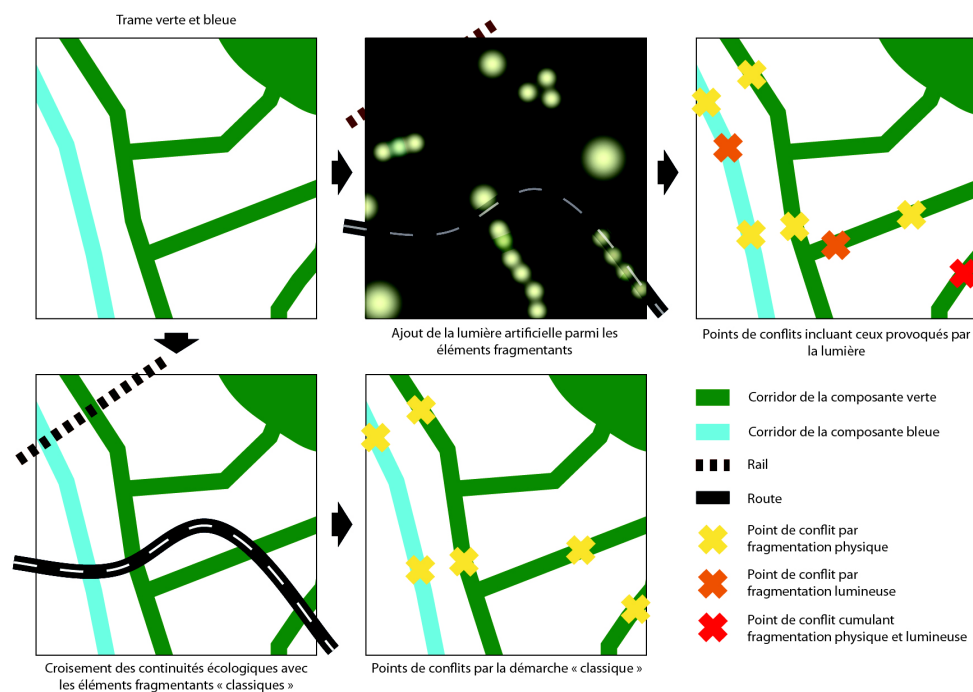
par Hale et al. (2015) pour tester la perméabilité globale du milieu urbain pour des chiroptères. Là encore plusieurs paramètres de l'éclairage nocturne peuvent être considérés pour l'attribution des coefficients de friction (cf. deuxième partie de l'article).

- 19 Une autre méthode géomatique, la « dilatation-érosion » est également utilisée pour identifier des corridors (Sordello et al., 2017). Elle consiste à appliquer puis à retirer consécutivement un tampon sur les zones nodales (réservoirs) du réseau écologique en prenant une espèce modèle. En géomatique, il s'agit ainsi d'appliquer une « fermeture ». Cela a pour effet de faire apparaître les espaces interstitiels entre les noyaux, pouvant être considérés comme des corridors potentiels. Dans cette méthode, il semble alors tout à fait faisable d'intégrer également un critère « obscurité » en choisissant la largeur du tampon appliqué comme la distance maximale que l'espèce modèle est capable de parcourir en environnement lumineux à partir des zones obscures qu'elle préfère (zones nodales).

L'identification des points/zones de conflits

- 20 Une fois le réseau écologique identifié, cette étape vise à repérer les points d'intersection problématiques (ou « points de conflits ») qui se forment avec des éléments hostiles aux flux biologiques. Cette étape consiste généralement à croiser le réseau écologique avec les éléments considérés comme fragmentants. Ce croisement fait ressortir des intersections dont il faut ensuite, pour plus de rigueur, confirmer ou non le caractère conflictuel. Les points de conflits peuvent aussi être hiérarchisés en fonction de leur infranchissabilité.
- 21 À 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 (Vanpeene et al., 2017). L'idée est ici d'effectuer ce croisement avec les données d'éclairage nocturne de manière à visualiser les points de conflits provoqués par la lumière artificielle (cf. Figure 2). Cette démarche a été mise en œuvre en France par le Parc naturel régional des Causses du Quercy (Garnier, 2012).

Figure 2. Illustration de la démarche d'identifier des points/zones de conflits provoqués par la lumière artificielle.



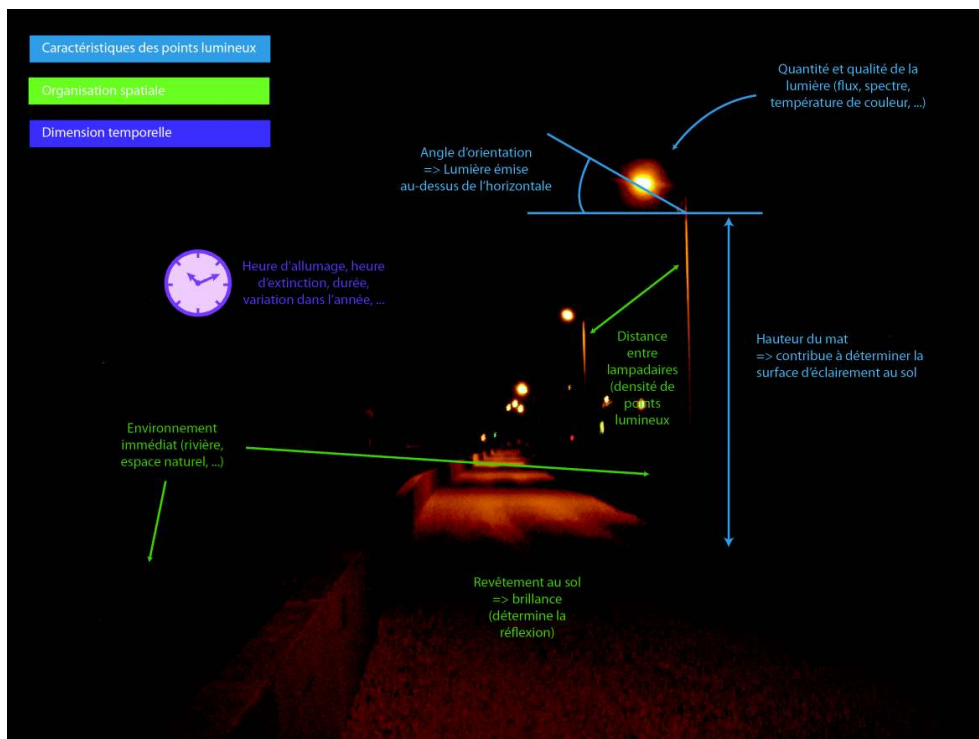
Le plan d'action pour préserver et restaurer le réseau écologique

- 22 L'identification d'un réseau écologique n'est qu'une première étape. Celui-ci doit ensuite être préservé et restauré dans le temps et des actions doivent donc être mises en place pour cela. L'objectif principal est de diminuer le niveau de fragmentation et en particulier de résorber les points/zones de conflits identifiés. Toute une série de mesures peut ainsi être mise en œuvre pour maintenir ou restaurer la fonctionnalité du réseau écologique.
- 23 Concernant la lumière artificielle, des préconisations de gestion peuvent être formulées pour moduler l'éclairage dans les corridors et les réservoirs ainsi que dans la matrice environnante. La qualité de la matrice est en effet également très importante pour le maintien d'une fonctionnalité écologique globale (Pino et Marull, 2012 ; Watling et al., 2011).
- 24 Les actions de gestion de l'éclairage peuvent, entre autres, porter (cf. Figure 3) :
- sur sa dimension temporelle, telle la pratique d'extinction de l'éclairage en milieu de nuit (Gaston et al., 2012). Cette dernière peut, dans le cas d'extinctions précoces, avoir des effets positifs sur certaines espèces de chauves-souris (Azam et al., 2015 ; Day et al., 2015). Les éclairages peuvent aussi être équipés d'horloges astronomiques ou de détecteurs de présence avec minuterie (« éclairage intelligent ») pour adapter au plus près des besoins l'allumage et l'extinction des lampes,
 - sur sa dimension spatiale, en travaillant sur la densité et la répartition des points lumineux (éclairage d'un point lumineux sur deux...). Certains espaces (falaises, combles, sites rupestres, clochers...) sont particulièrement recherchés par la faune nocturne (chauves-souris, rapaces nocturnes...) et devraient être prioritaires pour une diminution voire une

suppression de l'éclairage. Les cours d'eau et leurs milieux adjacents (ripisylves, zones humides...) sont aussi particulièrement sensibles du fait de leur richesse en biodiversité (aquatique, amphibie) (Perkin et al., 2011). D'autre part, l'eau est un facteur de polarisation de la lumière, ce qui accroît les impacts pour les espèces se repérant grâce à la lumière polarisée, tels que les insectes (Horvath et al., 2009). Pour diminuer les halos lumineux, il est aussi nécessaire de travailler sur la disposition des luminaires par rapport aux constructions ou à la topographie, car ceux-ci peuvent faire positivement obstacle et ainsi diminuer la diffusion de la lumière vers le ciel (Aubé, 2015). De même, la nature des revêtements au sol joue une grande importance dans la réflexion de la lumière vers le ciel (Aubé, 2016).

- sur les luminaires eux-mêmes : en modulant leur hauteur, leur orientation (préférentiellement vers le sol) ou encore en modifiant la lumière qu'ils émettent (spectre lumineux, intensité lumineuse, flux lumineux, luminance). En ce qui concerne les longueurs d'onde, il est très difficile d'émettre des préconisations valables pour tous les groupes taxonomiques, tant les sensibilités des espèces sont variables (Perkin et al., 2011 ; Musters et al., 2009). De fait, les lampes à large spectre (comme les LED, Light Emitting Diode) affectent en tous cas potentiellement plus d'espèces que les lampes à spectre étroit (comme les Sodium Haute-Pression, SHP) (Davies et al., 2013). Par ailleurs, du fait de leur forte proportion de bleu, les LED ont plus d'impacts que les lampes SHP sur les espèces utilisant cette partie du spectre, comme les insectes (Pawson et Bader, 2014). Si le choix des LED est fait pour des raisons économiques, certaines études préconisent au moins de privilégier du blanc « chaud », c'est-à-dire avec une faible température de couleur (Longcore et al., 2015 ; Aubé et al., 2013).
- 25 Des efforts de connaissances peuvent aussi être prévus dans le plan d'action. Les actions peuvent également être de l'ordre de l'accompagnement ou de l'incitation (lancement d'appels à projets, soutiens financiers...).

Figure 3. Schématisation des actions génériques de gestion de l'éclairage nocturne applicables dans les espaces d'un réseau écologique.



Atouts, faiblesses, besoins et limites pour les trois étapes considérées

- 26 Pour chacune des trois étapes présentées ci-dessus (1/corridors/réservoirs, 2/zones de conflits, 3/actions), il existe des atouts et des faiblesses par rapport à l'objectif que l'on peut leur attribuer en commun, qui est de réduire les nuisances lumineuses (Tableau 1). En outre, chaque approche présente des besoins et limites en termes de connaissances (Tableau 2). La figure 4 résume les besoins en données mis en évidence par le tableau 2.

Tableau 1. Atouts/Faiblesses de la prise en compte de la lumière artificielle à chacune des trois étapes d'élaboration d'un réseau écologique.

	Atouts	Faiblesses
1/Identification des éléments du réseau (réservoirs/corridors)	Permet d'identifier un réseau écologique qui ne comporte pas de blocage dû à la pollution lumineuse puisque la méthode ne retient que les zones favorables aux flux du vivant en considérant entre autres la lumière artificielle (ce qui ne signifie pas nécessairement des zones totalement noires => notion de seuil).	En conséquence, cette méthode classe sans doute d'emblée dans la catégorie « matrice » (c'est-à-dire ce qui ne constitue pas des nœuds ni des liens du réseau écologique) une part importante d'espaces qui pourraient peut-être pour certains redevenir favorables sans grandes difficultés, par une action de gestion (extinction de l'éclairage en cœur de nuit par exemple).
2/Identification des points/zones de conflits (obstacles)	Permet d'identifier des blocages forts sur le réseau écologique, provoqués par la lumière artificielle et éventuellement de hiérarchiser les points de conflits à résorber entre ceux qui sont dus à la fragmentation physique ou lumineuse ou ceux qui cumulent les deux. À noter que si l'étape 1 a été réalisée, il n'existe pas, a priori, de points de conflits entre le réseau écologique et la lumière artificielle puisque celle-ci est devenue un critère pour l'identification des éléments du réseau. Cette étape peut néanmoins venir en confirmation pour qualifier la fonctionnalité des éléments du réseau écologique et ainsi discriminer des mesures de gestion (réservoir/corridor à préserver ou à restaurer).	A priori, pas de faiblesse. Cette méthode se présente comme une étape pivot entre l'identification du réseau écologique et la mise en œuvre d'actions de préservation/restauration.

<p>3/Plan d'action (gérer la lumière artificielle dans le réseau écologique et sa matrice)</p>	<p>Prévoit le développement d'actions spécifiques sur la lumière artificielle. C'est donc la 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 pression à diminuer par l'action.</p> <p>Les actions peuvent être des mesures génériques de gestion de la lumière artificielle pour une réduction de pollution lumineuse (durée d'éclairage, intensité des lampes, densité de points lumineux...). Il peut aussi s'agir d'actions d'acquisition de connaissance ou de sensibilisation.</p>	<p>L'efficacité dépend ici totalement de la mise en œuvre effective du plan d'action.</p> <p>Par ailleurs, le risque est de se focaliser sur la réduction de la lumière artificielle au sein du réseau écologique uniquement et donc de délaissier l'ensemble des autres espaces (matrice) où des actions de réduction sont aussi nécessaires. 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 du réseau écologique.</p>
---	---	---

Source : D'après Sordello et al., 2014

Tableau 2. Besoins et limites actuelles en termes de connaissances pour la prise en compte de la lumière artificielle pour chacune des trois étapes d'élaboration d'un réseau écologique.

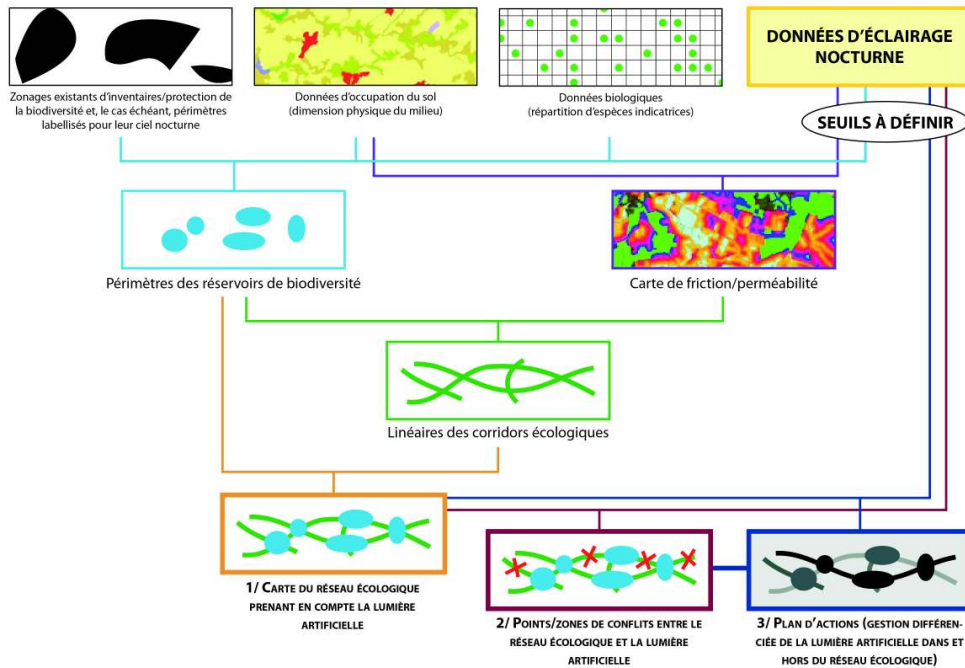
	Besoins	Limites
--	----------------	----------------

<p>1/Identification des éléments du réseau (réservoirs/ corridors)</p>	<p><u>Pour les nœuds (réservoirs) :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Disposer de données d'éclairage nocturne pour que la lumière artificielle puisse contribuer à définir la qualité écologique des espaces naturels étudiés - 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 la sensibilité à la lumière artificielle de la/ les espèce(s) qui serviront de modèles, afin d'attribuer de manière juste les coefficients de rugosité - Disposer des données d'éclairage nocturne, d'échelle suffisante pour ajouter la lumière artificielle aux critères habituels d'occupation du sol <p><i>Dilatation/Érosion</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 étape 1/nécessite donc de disposer :</p> <ul style="list-style-type: none"> - de connaissances fondamentales sur les exigences des espèces vis-à-vis de la lumière artificielle et plus généralement sur leur cycle biologique - de données biologiques (répartition d'espèces retenues comme indicatrices) 	<p>La notion de seuil est fondamentale. Dans cette approche, elle intervient à la fois pour les nœuds (réservoirs) et pour les liens (corridors). Par exemple, pour l'attribution des coefficients de rugosité pour les chemins de moindres coûts, il est nécessaire de savoir à partir de quand (où/quoi) la lumière est effectivement un frein pour les déplacements d'espèces : quels niveaux d'éclairement au sol, quelle gamme de longueurs d'onde, quelle distance par rapport à un point lumineux (ex : une maille d'occupation du sol non éclairée peut subir une pollution d'une maille voisine éclairée).</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 (nœuds), d'attribuer les coefficients de rugosités (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 chacun d'eux.</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 envers les « milieux ». Par exemple : espèces crépusculaires, espèces totalement nocturnes, espèces lucifuges strictes, sensibilités par longueurs d'onde...</p>
VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement	nocturne (pression)	Volume 17 numéro 3 décembre 2017

<p>2/Identification des points/zones de conflits (obstacles)</p>	<p>Cette étape nécessite :</p> <ul style="list-style-type: none"> - d'avoir préalablement identifié un réseau écologique (avec ou sans prise en compte de la lumière artificielle ; si c'est « avec », cette étape 2/perd de son intérêt, mais peut venir en confirmation de l'étape 1/ - de disposer de données d'éclairage nocturne (pression) 	<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 divers paramètres à l'origine des nuisances lumineuses.</p>
<p>3/Plan d'action (gérer la lumière artificielle dans le réseau écologique et sa matrice)</p>	<p>Pas de prérequis particuliers (au sens de données) puisque cette approche est tournée directement vers l'action après l'identification du réseau écologique</p> <p>Ces actions nécessitent en revanche des connaissances fondamentales et des retours d'expériences et d'évaluation de l'efficacité de telle ou telle mesure (choix des longueurs d'onde en fonction des espèces, seuil minimal d'éclairement toléré, efficacité de l'abaissement des flux...).</p>	<p>Cette approche 3/implique beaucoup plus que les deux précédentes 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>

Source : D'après Sordello et al., 2014

Figure 4. Schématisation des principaux besoins en données aux différentes étapes d'un réseau écologique.



Réflexion prospective pour aller plus loin

Sur les métriques d'éclairage nocturne

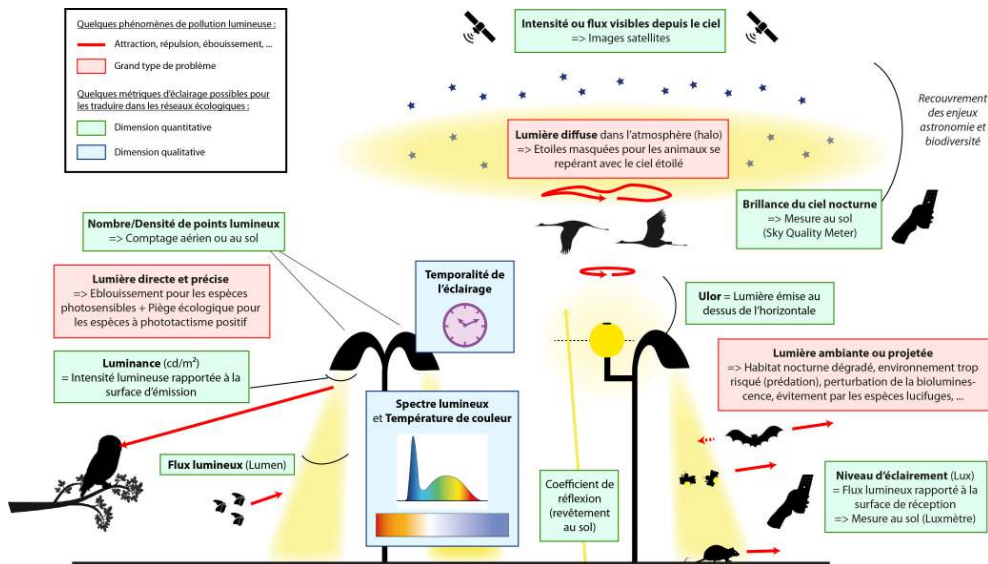
- 27 Il apparaît clairement que des données d'éclairage nocturne sont nécessaires quelle que soit l'étape retenue pour prendre en compte la lumière artificielle dans les réseaux écologiques. Il est donc indispensable de parvenir à déterminer concrètement quels paramètres de la lumière doivent être considérés. La réflexion présentée ici est une amorce et devra être approfondie.
- 28 Le problème est en effet complexe, car la pollution lumineuse se manifeste de différentes manières vis-à-vis de la biodiversité. Il s'agit notamment d'un phénomène :
- de lumière « directe » se traduisant par des risques d'éblouissement voire de lésions oculaires. Ce sujet est peu exploré in situ, mais une exposition à la lumière artificielle peut effectivement entraîner des lésions oculaires chez certains animaux nocturnes (ex. : Ji et al., 2014),
 - de lumière « précise », chaque point lumineux comportant un pouvoir, soit attractif, soit répulsif sur la plupart des animaux la nuit (ex. : Nakamura et Yamashita, 1997),
 - de lumière « ambiante » ou « projetée » : l'éclairage du sol et des feuillages sont interprétés par de nombreuses espèces comme un risque accru de prédation et entraîne une réaction d'évitement des zones éclairées (ex. : Zollner et Lima, 1999). La qualité des habitats nocturnes est dégradée (Picchi et al., 2013),
 - de lumière « diffuse » : l'association des particules de lumière et des particules en suspension dans l'atmosphère, amplifiée par la pollution de l'air (aérosols), forme un halo lumineux (ex. : Aubé, 2015). La lumière stagne dans l'atmosphère au lieu de s'échapper vers l'Univers, ce qui crée une « couverture » lumineuse qui masque les étoiles. Or, plusieurs

- espèces utilisent le ciel étoilé pour leur repérage nocturne (ex : Wiltschko et Wiltschko, 1977 ; Mauck et al., 2008 ; Smolk et al., 2016).
- 29 Idéalement, c'est donc l'ensemble de ces phénomènes (et même d'autres encore) qu'il faut tenter prendre en compte dans les réseaux écologiques. La difficulté est alors de parvenir à les traduire sous forme de métriques quantifiables pour les intégrer dans les réseaux écologiques (dans les modélisations notamment).
- 30 Une première approche synthétique et basique pourrait déjà être de considérer la densité de points lumineux. En effet, puisque chaque point lumineux est susceptible de constituer un piège écologique et de provoquer des éblouissements, la densité de points lumineux a des conséquences directes sur la biodiversité, indépendamment de la quantité et de la qualité de lumière émise. De plus, en France, de nombreuses communes mettent désormais à disposition un recensement cartographique de leurs points lumineux (ex. : Paris, Montpellier...). Des recensements aériens sont aussi possibles. Néanmoins, pour un travail plus approfondi, il est préférable de considérer différentes variables d'éclairage.
- 31 Plusieurs métriques existent en éclairagisme pour définir la quantité de lumière émise et perçue :
- l'intensité lumineuse (candela, cd) ou le flux lumineux (lumen, lm) : c'est la quantité de lumière émise dans une direction, par un rayon ou par l'ensemble des rayons d'une source lumineuse. S'agissant de variables directionnelles, elles semblent pertinentes surtout pour aborder les notions d'éblouissement et de lumière intrusive sur la faune. Néanmoins ces variables sont très peu, voire pas du tout, utilisées dans les publications relatives à la biodiversité,
 - la luminance (cd.m^{-2}) ou le niveau d'éclairement (lm.m^{-2} , nommés lux), qui sont calculés en rapportant la quantité de lumière (respectivement l'intensité ou le flux) à la surface qui l'émet ou la reçoit. En écologie, la plupart des publications raisonnent généralement par rapport à des niveaux d'éclairement au sol c'est-à-dire en « lux » (ex : Botha et al., 2017 ; Riley et al., 2015 ; Lacoeylle et al., 2014 ; Perkin et al., 2014, Gaston et al., 2013 ; Bishop 1969).
- 32 Chacune de ces métriques possède des avantages et des inconvénients. Développer une approche à partir de l'intensité lumineuse nécessite de définir l'orientation à considérer (en angle zénithal et azimutal). Pour l'azimut, la moyenne sur tous les angles serait probablement une bonne approche, mais pour l'angle au zénith les angles près de l'horizontale seraient sûrement les plus importants pour plusieurs espèces (com. pers. Aubé). L'usage du flux permet de se libérer de cette question puisqu'il s'intéresse à l'ensemble des rayons émis dans toutes les directions. Il faut souligner néanmoins que toutes ces unités ont été définies par rapport à l'œil humain, ce qui présente une limite certaine pour leur transposition au reste du monde animal.
- 33 En astronomie, la métrique souvent utilisée est la brillance du ciel nocturne que l'on peut mesurer (en magnitude.arc.sec²) à l'aide d'un appareil SQM (Sky Quality Meter) (Walker et al., 2017). Cette métrique permet de quantifier le niveau de visibilité (noirceur) du ciel étoilé et renseigne donc sur le halo de pollution lumineuse. À titre d'exemple, pour une labellisation RICE, une qualité du ciel nocturne supérieure à 20.00 est demandée pour un niveau « argent » et au-dessus de 21.75 pour un niveau « or » (IDA, 2015). Comme expliquée précédemment, cette métrique peut aussi être pertinente pour évaluer une partie des impacts sur la biodiversité, relatifs à la visibilité du ciel étoilé pour certaines espèces nocturnes (oiseaux migrateurs, insectes...). Néanmoins, elle ne suffit pas pour

couvrir l'ensemble des enjeux écologiques. En effet, les points de haute brillance du ciel au zénith ne sont pas nécessairement les points avec une haute lumière intrusive. La première est liée de près à la lumière se propageant au-dessus de l'horizon (directe ou réfléchi) alors que la seconde est plus liée à la lumière qui se propage de l'horizontale jusqu'au nadir (com. pers. Aubé). La brillance du ciel nocturne ne peut donc pas suffire pour établir la carte de friction ou repérer les points de conflits.

- 34 La qualité de la lumière émise peut, quant à elle, être appréciée notamment par son spectre lumineux c'est-à-dire la proportion des différentes longueurs d'onde contenues dans la lumière. La température de couleur (exprimée en Kelvin) est aussi pratique et de plus en plus de publications s'y intéressent en écologie (ex : Longcore et al., 2015 ; Pawson et Bader, 2014). Néanmoins, le spectre lumineux a son importance au-delà de la température de couleur de la lumière émise ; ces deux métriques ne sont pas interchangeables. En effet, à température de couleur équivalente, une lumière peut correspondre à des spectres lumineux différents comportant plus ou moins de bleus ou de rouges. Ici, la notion d'indice spectral comme proposée par Aubé et al. (2013) pourrait être intéressante. Cependant, les indices de Aubé et al. ont été définis par rapport à la photosynthèse, à la visibilité du ciel étoilé et à la production de la mélatonine, ce qui ne couvre donc pas toutes les interactions entre lumière et biodiversité. Ces indices sont normalisés pour enlever l'effet de la puissance spectrale et ne garder que l'effet de la forme du spectre. Une piste pourrait donc être de multiplier ces indices par l'intensité lumineuse ou le flux lumineux pour obtenir un indicateur incorporant à la fois l'information de la forme du spectre et la quantité de lumière (com. pers. Aubé).
- 35 Les différents d'éclairage doivent être relevés par des mesures au sol, aériennes ou satellitaires en vue d'être cartographiées pour les réseaux écologiques. Pour des travaux à l'échelle très locale, des caractéristiques des points lumineux et de leur environnement, relevés sur le terrain pourraient aussi être ajoutés pour pondérer les coefficients (ex. : orientation des luminaires, coefficient de réflexion des revêtements au sol...). Enfin, la temporalité des éclairages (horaires au cours d'une nuit, mais aussi variations au cours de l'année) pourrait également entrer en compte pour déterminer la qualité ou la perméabilité paysagère. En effet, si une commune pratique par exemple une extinction de son éclairage public en cœur de nuit, le niveau de pression est différent en fonction des heures de la nuit. Certains espaces peuvent être infranchissables à une certaine heure de la nuit, mais redevenir perméables à d'autres heures de la nuit. La question est donc comment prendre en compte cette variabilité dans les réseaux écologiques. Une approche possible pourrait être de retenir le moment le plus néfaste pour en faire l'état de référence à intégrer dans les modèles. Une autre démarche serait de pondérer là aussi les coefficients attribués, en fonction de l'existence ou non d'une régulation temporelle de l'éclairage.

Figure 5. Premiers éléments de réflexion sur les variables d'éclairage à considérer dans un réseau écologique.



Sur la définition de seuils acceptables pour ces variables

- 36 Pour les différentes métriques considérées, il s'agit ensuite de déterminer des seuils ou a minima des intervalles de sensibilité pour la biodiversité.
- 37 Pour ce faire, il est préconisé de fonctionner par cortège ou guildes d'espèces. En effet, s'il peut être justifié d'identifier un réseau écologique pour une espèce en particulier (qui présenterait des enjeux de conservations spécifiques), la plupart du temps, le propre d'une démarche de réseau écologique est d'être englobante, c'est-à-dire multi-taxons. Pragmatiquement, il n'est de toute façon pas envisageable d'identifier des corridors et des réservoirs séparément pour chaque espèce. En conservation, il est donc fréquent de procéder avec des espèces représentatives ou indicatrices, constituant des « proxy » pour atteindre plus largement d'autres espèces (Caro, 2010). Ici, l'objectif est donc de définir des espèces « cibles » permettant de couvrir les différentes manifestations de la pollution lumineuse évoquées précédemment.
- 38 En outre, les espèces ont des exigences d'habitats différentes pour vivre et se déplacer et au final un corridor pour une espèce peut représenter un obstacle pour une autre. Pour cette raison, les réseaux écologiques se déclinent généralement par grands types de milieux. Le réseau écologique complet résulte ensuite de la compilation de ces sous-réseaux. Pour la pollution lumineuse, on constate que celle-ci a bien des effets sur des espèces inféodées à toute une variété de milieux naturels, par exemple les milieux aquatiques (ex. : Riley et al., 2013), les milieux humides (ex. : Hall et al., 2016), les milieux boisés (ex. : Threfall et al., 2013), les milieux ouverts (ex. : Davies et al., 2017) ou encore les milieux littoraux (ex. : Thums et al., 2016). Il est donc nécessaire d'identifier des réservoirs de biodiversité et des corridors nocturnes pour une palette large de milieux, a minima ces cinq grands habitats cités précédemment.
- 39 Au final, la démarche consistera donc à identifier pour chacun des milieux choisis des espèces particulièrement sensibles dont les exigences peuvent traduire des niveaux d'acceptabilité ou des plages de tolérance pour les différentes variables retenues. Aboutir

à un indicateur unique permettant de prendre en compte les différentes variables d'éclairage serait ici pratique. La difficulté reste dans tous les cas le manque de connaissances scientifiques sur les espèces. Des données chiffrées sont disponibles pour quelques taxons et ont parfois déjà été centralisées (ex. : voir Gaston et al. (2013) pour les niveaux d'éclairement). En revanche, certains groupes biologiques restent particulièrement dépourvus de connaissance alors que l'on peut supposer sur eux des effets très néfastes de l'éclairage nocturne (ex. : rapaces nocturnes).

- 40 Une piste pourrait alors être de mobiliser les études s'intéressant au comportement de la biodiversité nocturne en contexte naturel, car celles-ci sont déjà plus abondantes. En effet, la phase de la Lune influence fortement certaines espèces particulièrement sensibles à la lumière. Celles-ci stoppent alors leur activité lorsque les niveaux d'éclairement dus à la Lune sont trop forts. Ce phénomène a été étudié chez de nombreux groupes biologiques, tels que les mammifères (ex. : Prugh et Golden, 2014) dont les chauves-souris (ex. : Saldaña-Vazquez et Munguia-Rosas, 2013), les oiseaux marins (ex. : Riou et Hamer, 2008), les reptiles (ex. : Clarke et al., 1996). Ces résultats peuvent déjà permettre d'identifier les espèces particulièrement sensibles à la lumière nocturne voire de déterminer des seuils de bascules.

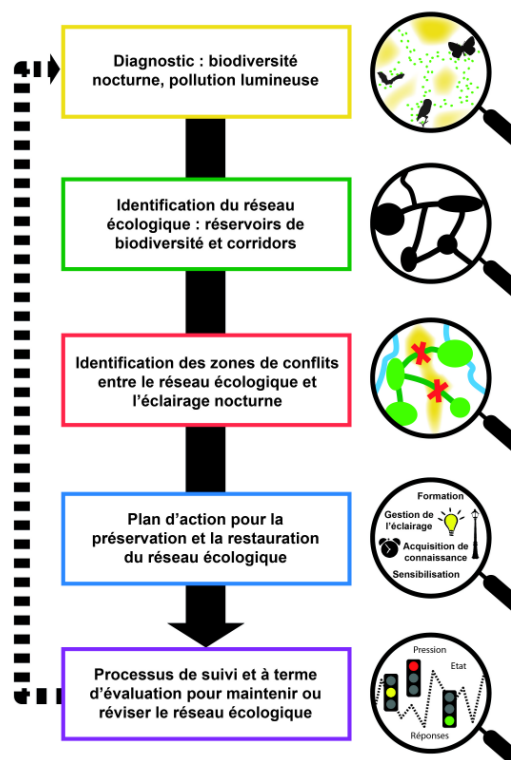
Conclusion

- 41 Cet article est le fruit d'une démarche exploratoire qui devra être approfondie. Tout d'abord, il propose des pistes méthodologiques pour prendre en compte la pollution lumineuse dans une démarche de réseaux écologiques. Cette dernière peut ainsi être intégrée comme un paramètre nouveau pour la caractérisation des éléments du réseau écologique (réservoirs, corridors). Elle peut aussi servir à identifier *a posteriori* des zones de conflits sur le réseau écologique. Enfin, elle peut aussi être visée par des actions dans le cadre de la mise en œuvre du réseau écologique, notamment à travers une régulation de l'éclairage nocturne.
- 42 Cet article propose également une première réflexion concernant les paramètres (métriques) de la lumière artificielle à considérer et la sélection d'espèces cibles, pour aller encore plus loin dans l'intégration de la pollution lumineuse dans les réseaux écologiques.
- 43 La première difficulté est de tenir compte des différents effets de la pollution lumineuse sur la biodiversité. Pour cela, il est nécessaire de traduire la pollution lumineuse en plusieurs variables liées à la quantité et à la qualité de la lumière. Les paramètres utilisés en éclairagisme (ex. : flux, éclairement) ou en astronomie (noirceur du ciel nocturne) peuvent être mobilisés, mais ceux-ci présentent inévitablement des limites pour une transposition telle quelle à la biodiversité. L'autre difficulté est de définir des seuils ou des gammes de sensibilité pour la biodiversité. Pour cela, des espèces indicatrices particulièrement sensibles à la lumière artificielle nocturne pourraient être utilisées comme proxy pour différents types de milieux naturels. Pour les déterminer, un travail doit être mené à partir de la bibliographie existante sur la lumière artificielle, mais aussi celle qui porte sur le comportement des espèces nocturnes par rapport au cycle lunaire.
- 44 Comme la connaissance scientifique manque encore, il est nécessaire d'encourager la recherche sur les conséquences de la pollution lumineuse sur la biodiversité, dans une visée opérationnelle (ex. : tester l'influence des différentes grandeurs de l'éclairage,

évaluer l'efficacité de telle ou telle mesure de gestion). Les études manipulatoires, permettant d'isoler le facteur étudié et de minimiser les variables confondantes, sont à privilégier. En particulier, les protocoles de type BACI (Before, After, Control Intervention) permettant de mettre en évidence des causalités devraient être généralisés (Douglazet, 2016). Connaître les impacts des différentes longueurs d'ondes doit aussi être approfondie compte tenu de la conversion actuelle des luminaires SHP (lumière jaune/orange) vers des LED (lumière blanche avec une forte proportion de bleu). Pour cela des études comparatives entre lampes sont aussi nécessaires (ex. : Aubé et al., 2013). Ultérieurement, des revues systématiques ou a minima des méta-analyses seront à entreprendre pour transférer ces connaissances de la recherche vers la sphère opérationnelle. Sur certaines questions réunissant déjà plusieurs études, des revues systématiques pourraient être envisagées dans un futur proche.

- 45 Enfin, la construction d'indicateurs de suivis, selon le modèle Pression-Etat-Réponse, est aussi à prévoir pour évaluer l'efficacité de la préservation et la restauration du réseau écologique et de la mise en œuvre de ses actions. À terme le suivi doit aboutir à une évaluation pour décider du maintien ou de la révision du réseau écologique. En conclusion, la Figure 6 illustre toutes les étapes à dérouler incluant les trois étapes détaillées dans l'article, précédées du diagnostic et prolongées par le dispositif de suivi de la mise en œuvre et d'évaluation.

Figure 6. Récapitulatif de toutes les étapes d'une démarche de réseau écologique avec prise en compte de la lumière artificielle.



- 46 En ouverture, il faut souligner que cet article se place dans une situation où la lumière artificielle existe et il propose alors des mesures pour tenir compte et réduire ses effets sur la biodiversité. Néanmoins, un questionnement plus vaste - d'ordre sociétal - doit avoir lieu en amont sur l'opportunité même d'éclairer. En effet, le développement de l'éclairage public répond initialement à un besoin exprimé par les humains, animaux

diurnes, d'éclairer la nuit pour prolonger leur activité. Malgré cela, une gestion différenciée pour raisonner cet éclairage est inévitable pour atteindre une vraie cohabitation avec la vie nocturne (partage de l'espace et du temps). L'évolution des pratiques dans la gestion de la végétation est en ce sens un modèle dont il faut s'inspirer. Celle-ci se traduit désormais, par exemple au sein d'une même ville, par un mixte entre des zones où la végétation répond aux besoins des humains (ex. : pelouses rases pour les loisirs) et des zones où la végétation est laissée à sa libre évolution au profit de la biodiversité. Ce modèle de gestion différenciée devrait être transposé à l'éclairage nocturne. Cela sous-entend que dans certaines zones l'éclairage doit être réduit et même parfois totalement proscrit. Mais dans la mesure où la gestion de l'éclairage - notamment public - n'était pas véritablement pensée ni organisée jusqu'ici, il existe incontestablement une marge de manœuvre importante sans perte de confort pour les humains. Par ailleurs, des dynamiques récentes montrent que l'obscurité (re)devient peu à peu aussi un facteur d'esthétisme dans la ville (Edensor, 2015). La nuit et ses archétypes (biodiversité, ciel étoilé...) deviennent aussi de plus en plus un vecteur de tourisme et d'attractivité territoriale (Challéat et al., 2015). Des démarches en synergie peuvent donc potentiellement être imaginées entre les différents volets de la pollution lumineuse.

- 47 Dans le même temps, des zones de frictions peuvent aussi apparaître entre les différents enjeux. Par exemple, l'installation de LED que l'on constate actuellement répond à un objectif de réduction des consommations d'énergie. Les LED permettent en outre un meilleur rendu des couleurs que les lampes à sodium (couleur orange/rouge) et offrent ainsi un meilleur confort visuel et un sentiment de sécurité renforcé pour les usagers (Peña-García et al., 2015). Or, ces nouvelles technologies peuvent poser problème pour la biodiversité, notamment à cause de leur spectre. Il est donc indispensable que les enjeux de biodiversité pèsent dans les choix de la gestion de l'éclairage nocturne afin que les réponses apportées pour répondre à d'autres enjeux n'aboutissent pas à une situation plus mauvaise.

BIBLIOGRAPHIE

Able, K.P. et M.A. Able, 1990, Calibration of the magnetic compass of a migratory bird by celestial rotation, *Nature* [en ligne], 347, pp. 378-380, URL : <https://doi.org/10.1038/347378a0>

Aubé, M., 2016, The LED outdoor lighting revolution : Opportunities, threats and mitigations for urban and rural citizens, dans : 53rd International Making Cities Livable Conference on Caring, for our Common Home : Sustainable, Healthy, Just Cities & Settlement, Vatican city, Rome, Italy.

Aubé, M., 2015, Physical Behaviour of Anthropogenic Light Propagation into the Nocturnal Environment, *Philosophical Transactions of the Royal Society - B*, 370, 1667, [en ligne] URL : <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0117>

Aubé, M., J. Roby et M. Kocifaj, 2013, Evaluating Potential Spectral Impacts of Various Artificial Lights on Melatonin Suppression, Photosynthesis, and Star Visibility, *PLOS One* [en ligne], 8, 7, e67798, URL : <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067798>

- Azam, C., C. Kerbiriou, A. Vernet, J.F. Julien, Y. Bas, L. Plichard, J. Maratrat et I. Le Viol, 2015, Is part-night lighting an effective measure to limit the impacts of artificial lighting on bats ?, *Global Change Biology* [en ligne], 21, 8, URL : <https://doi.org/10.1111/gcb.13036>
- Baker, B.J. et J.M.L., Richardson, 2006, The effect of artificial light on male breeding-season behaviour in green frogs, *Rana clamitans melatona*, *Canadian Journal of Zoology* [en ligne], 84, pp. 1528-1532, URL : <https://doi.org/10.1139/z06-142>
- Beier, P., 1995, Dispersal of Juvenile Cougars in Fragmented Habitat, *The Journal of Wildlife Management* [en ligne], 59, 2, pp. 228-237, URL : <https://doi.org/10.2307/3808935>
- Bennie, J., T.W. Davies, D. Cruse et K.J. Gaston, 2016, Ecological effects of artificial light at night on wild plants, *Journal of Ecology* [en ligne], 104, 3, pp. 611-620, URL : <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12551>
- Bishop, J.E., 1969, Light Control of Aquatic Insect Activity and Drift, *Ecology* [en ligne], 50, 3, pp. 371-380, URL : <https://doi.org/10.2307/1933885>
- Bliss-Ketchum, L.L., C.E. De Rivera, B.C. Turner et D.M. Weisbaum, 2016, The effect of artificial light on wildlife use of a passage structure, *Biological Conservation* [en ligne], 199, pp. 25-28, URL : <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.04.025>
- Botha, L.M., T.M. Jones et G.R. Hopkins, 2017, Effects of lifetime exposure to artificial light at night on cricket (*Teleogryllus commodus*) courtship and mating behavior, *Animal Behaviour* [en ligne], 129, pp. 181-188, URL : <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2017.05.020>
- Burel, F. et J., Baudry, 1999, *Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications*, Paris, Tec & Doc, 359 p.
- Canario, F., A.H. Leitaoa et R. Tomé, 2012, Predation Attempts by Short-eared and Long-eared Owls on Migrating Songbirds Attracted to Artificial Lights, *Journal of Raptor Research* [en ligne], 46, 2, pp. 232-234, URL : <https://doi.org/10.3356/JRR-11-15.1>
- Caro, T.M., 2010, *Conservation by Proxy : Indicator, umbrella, keystone, flagship, and other surrogate*, Island Press, 400 p.
- Challéat, S., P.O. Dupuy, D. Lapostolle, R. Bénos, J. Milian, T. Poméon et F. Girard, 2015, Des nuits blanches sous un ciel noir ? La protection de la nuit, nouvelle préoccupation des territoires, *L'ENA hors les murs*, Magazine des Anciens élèves de l'ENA, 453, pp. 30-32.
- Challéat, S., 2010, « Sauver la nuit » – Empreinte lumineuse, urbanisme et gouvernance des territoires, Thèse de Géographie, Université de Bourgogne, France, 540 p.
- Challéat, S. et D. Lapostolle, 2015, (Ré)concilier éclairage urbain et environnement nocturne : les enjeux d'une controverse sociotechnique, *Natures Sciences Sociétés* [en ligne], 22, 4, pp. 317-328, URL : <https://doi.org/10.1051/nss/2014045>
- Clarke, J.A., J.T. Chopko et S.P. Mackessy, 1996, The Effect of Moonlight on Activity Patterns of Adult and Juvenile Prairie Rattlesnakes (*Crotalus viridis viridis*), *Journal of Herpetology* [en ligne], 30, 2, 192-197, URL : <https://doi.org/10.2307/1565509>
- Cowan, T. et G. Gries, 2009, Ultraviolet and violet light : attractive orientation cues for the Indian meal moth, *Plodia interpunctella*, *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 131, 2, pp. 148-158, [en ligne] URL : <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2009.00838.x>
- Culmsee, H., M. Schmidt, I. Schmiedel, A. Schacherer, P. Meyer et C. Leuschner, 2014, Predicting the distribution of forest habitat types using indicator species to facilitate systematic

- conservation planning, *Ecological Indicators* [en ligne], 37, pp. 131-144, URL : <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.10.010>
- Dacke, M., E. Baird, M. Byrne, C.H. Scholtz et E.J. Warrant, 2013, Dung Beetles Use the Milky Way for Orientation, *Current Biology* [en ligne], 23, 4, pp. 298-300, URL : <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.12.034>
- Dale, M.R.T. et M.J. Fortin, 2005, From Graphs to Spatial Graphs. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 41, pp. 21-38, [en ligne] URL : <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144718>
- Day, J., J. Baker, H. Schofield, F. Mathews et K.J. Gaston, 2015, Part-night lighting : implications for bat conservation : Part-night lighting and bats, *Animal Conservation* [en ligne], 18, 6, pp. 512-516, URL : <https://doi.org/10.1111/acv.12200>
- Damschen, E.L., N.M., Haddad, J.L., Orrock, J.J., Tewksbury et D.J., Levey, 2006, Corridors Increase Plant Species Richness at Large Scales, *Science* [en ligne], 313, 5791, pp. 1284-1286, URL : <https://doi.org/10.1126/science.1130098>
- Davies, T.W., J. Bennie, D. Cruse, D. Blumgart, R. Inger et K.J. Gaston, 2017, Multiple night-time light-emitting diode lighting strategies impact grassland invertebrate assemblages, *Global Change Biology* [en ligne], 23, 7, pp. 2641-2648, URL : <https://doi.org/10.1111/gcb.13615>
- Davies, T.W., J. Bennie, R. Inger, N. Hempel De Ibarra et K.J. Gaston, 2013, Artificial light pollution : are shifting spectral signatures changing the balance of species interactions ?, *Global Change Biology* [en ligne], 19, pp. 1417-1423, URL : <https://doi.org/10.1111/gcb.12166>
- Downs, N.C., V. Beaton, J. Guest, J. Polanski et S.L. Robinson, 2003, The effects of illuminating the roost entrance on the emergence behaviour of *Pipistrellus pygmaeus*, *Biological Conservation* [en ligne], 111, pp. 247-252, URL : [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(02\)00298-7](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(02)00298-7)
- Douglazet, M., 2016, Elaboration d'un protocole d'étude de l'impact de l'éclairage artificiel sur les déplacements des mammifères terrestres nocturnes, Rapport de stage, Parc naturel régional des Causses du Quercy, France, 29 p.
- Duffy, J.P., J. Bennie, A.P. Duran et K.J. Gaston, 2015, Mammalian ranges are experiencing erosion of natural darkness, *Scientific Reports*, 5, 12042, [en ligne] URL : <https://doi.org/10.1038/srep12042>
- Durrant, J., E.B. Michaelides, T. Rupasinghe, D. Tull, M.P. Green et T.M. Jones, 2015, Constant illumination reduces circulating melatonin and impairs immune function in the cricket *Teleogryllus commodus*, *PeerJ* [en ligne], e1075, URL : <https://doi.org/10.7717/peerj.1075>
- Edensor, T., 2015, Light design and atmosphere, *Visual Communication* [en ligne], 14, 3, pp. 331-350, URL : <https://doi.org/10.1177/1470357215579975>
- Erren, T.C., P. Morfeld, R.G. Foster, R.J. Reiter, J.V. Grob et I.K. Westermann, 2016, Sleep and cancer : Synthesis of experimental data and meta-analyses of cancer incidence among some 1,500,000 study individuals in 13 countries, *Chronobiology International : The Journal of Biological and Medical Rhythm Research* [en ligne], 33, 4, pp. 325-350, URL : <https://doi.org/10.3109/07420528.2016.1149486>
- Falchi, F., P. Cinzano, D. Duriscoe, C.C.M. Kyba, C.D. Elvidge, K. Baugh, B.A. Portnov, N.A. Rybnikova et R. Furgoni, 2016, The new world atlas of artificial night sky brightness, *Science Advances* [en ligne], 2, 6, e1600377, URL : <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377>

- Gaston, K.J., J. Bennie, T.W. Davies et J. Hopkins, 2013, The ecological impacts of nighttime light pollution : a mechanistic appraisal, *Biological Reviews* [en ligne], 88, 4, pp. 912-927, URL : <https://doi.org/10.1111/brv.12036>
- Gaston, K.J., T.W. Davies, J. Bennie et J. Hopkins, 2012, Reducing the ecological consequences of night-time light pollution : options and developments, *Journal of Applied Ecology* [en ligne], 49, pp. 1256-1266, URL : <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02212.x>
- Gaston, K.J., J.P. Duffy et J. Bennie, 2015, Quantifying the erosion of natural darkness in the global protected area system, *Conservation Biology* [en ligne], 29, 4, pp. 1132-1141, URL : <https://doi.org/10.1111/cobi.12462>
- Gaston, K.J., S.F. Jackson, L. Cantu-Salazar et G. Cruz-Pinon, 2008, The ecological performance of protected areas, *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* [en ligne], 39, pp. 93-111, URL : <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.39.110707.173529>
- Gerrish, G.A., J.G. Morin, T.J. Rivers et Z. Patrawala, 2009, Darkness as an ecological resource : the role of light in partitioning the nocturnal niche, *Oecologia* [en ligne], 160, pp. 525-536, URL : <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1327-8>
- Gillies, C.S. et C. Cassady St. Clair, 2008, Riparian corridors enhance movement of a forest specialist bird in fragmented tropical forest, *PNAS* [en ligne], 105, 50, pp. 19774-19779, URL : <https://doi.org/10.1073/pnas.0803530105>
- Garnier, H., 2012, Comment prendre en compte la pollution lumineuse dans l'identification des continuités écologiques ?, Université Paris Diderot, Rapport de stage, Parc naturel régional des Causses du Quercy, France, 188 p.
- Graves, T., R.B. Chandler, J.A. Royle, P. Beier et K.C. Kendall, 2014, Estimating landscape resistance to dispersal, *Landscape Ecology* [en ligne], 29, pp. 1201-1211, URL : <https://doi.org/10.1007/s10980-014-0056-5>
- Gwiazdzinski, L., 2002, La nuit dimension oubliée de la ville, entre insécurité et animation, Thèse de doctorat en géographie, Faculté de géographie de Strasbourg sous la direction de Colette Cauvin-Reymond, France, 761 p.
- Hale, J.D., A.J. Faibrass, T.J. Matthews, G. Davies et J.P. Sadler, 2015, The ecological impact of city lighting scenarios : exploring gap crossing thresholds for urban bats, *Global Change Biology* [en ligne], 21, 7, pp. 2467-2478, URL : <https://doi.org/10.1111/gcb.12884>
- Hall, A.S., 2016, Acute Artificial Light Diminishes Central Texas Anuran Calling Behavior, *American Midland Naturalist* [en ligne], 175, 2, pp. 183-193, URL : <https://doi.org/10.1674/0003-0031-175.2.183>
- Hauptfleisch, M.L. et C. Dalton, 2015, Arthropod phototaxis and its possible effect on bird strike risk at two Namibian airports, *Applied Ecology and Environmental Research*, 13, 4, pp. 957-965, URL : https://10.15666/aeer/1304_957965
- Hepcan, S., C.C. Hepcan, I.M. Bouwma, R.H.G. Jongman et M.B. Ozkana, 2009, Ecological networks as a new approach for nature conservation in Turkey : A case study of Izmir Province, *Landscape and Urban Planning* [en ligne], 90, pp. 143-154, URL : <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.10.023>
- Holker, F., C. Wolter, E.K. Perkin et K. Tockner, 2010, Light pollution as a biodiversity threat, *Trends in Ecology & Evolution*, 25, 12, pp. 681-682.

- Horvath, G., G. Kriska, P. Malik et B. Robetson, 2009, Polarized light pollution : a new kind of ecological photopollution, *Frontiers in Ecology and the Environment* [en ligne], 7, 6, pp. 317-325, URL : <https://doi.org/10.1890/080129>
- Imber, M.J., 1975, Behavior of petrels in relation to the moon and artificial lights, *Notornis*, 22, 4, pp. 302-306
- International Dark Sky (IDS), 2015, Association Dark Sky Reserve Program Guidelines, 14 p.
- Ji, L., Z. Zhao, X. Zhu, Y. Yu, L. Shen et L. Wang, 2014, Harmful effects on organism induced by light of different wavelength and power, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* [en ligne], 125, 19, pp. 5808-5812, URL : <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.05.048>
- Jongman, R.H.G., 1995, Nature conservation planning in Europe : developing ecological networks, *Landscape and Urban Planning* [en ligne], 32, 3, pp. 169-183, [https://doi.org/10.1016/0169-2046\(95\)00197-0](https://doi.org/10.1016/0169-2046(95)00197-0)
- Khan, W., S.M. Khan, H. Ahmad, Z. Ahmad et S. Page, 2016, Vegetation mapping and multivariate approach to indicator species of a forest ecosystem : A case study from the Thandiani sub Forests Division (TsFD) in the Western Himalayas, *Ecological Indicators* [en ligne], 71, pp. 336-351, URL : <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.059>
- Knop, E., L. Zollera, R. Rysera, C. Gerpea, M. Hörlera et C. Fontaine, 2017, Artificial light at night as a new threat to pollination, *Nature* [en ligne], 548, pp. 206-209, URL : <https://doi.org/10.1038/nature23288>
- Kyba, C.C.M. et F. Holker, 2013, Do artificially illuminated skies affect biodiversity in nocturnal landscapes ?, *Landscape Ecology* [en ligne], 28, 9, pp. 1637-1640, URL : <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9936-3>
- Lacoeuilhe, A., N. Machon, J.F. Julien, A. Le Bocq et C. Kerbirou, 2014, The Influence of Low Intensities of Light Pollution on Bat Communities in a Semi-Natural Context, *PLOS One* [en ligne], 9, 10, e103042, pp. 1-8, URL : <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103042>
- Lapostolle, D., S. Challéat, J. Milian et P.O. Dupuy, 2015, L'appropriation de la transition énergétique par la protection des ressources environnementales nocturnes : expériences dans les Pyrénées et les Alpes du sud, *Géocarrefour*, 90, pp. 351-360.
- Le Corre, M., A. Ollivier, S. Ribes et P. Jouventin, 2002, Light-induced mortality of petrels : a 4-year study from Reunion Island (Indian Ocean), *Biological Conservation* [en ligne], 105, pp. 93-102, URL : [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(01\)00207-5](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(01)00207-5)
- Li, H., D. Li, T. Li, Q. Qiao, J. Yang et H. Zhang, 2010, Application of least-cost path model to identify a giant panda dispersal corridor network after the Wenchuan earthquake—Case study of Wolong Nature Reserve in China, *Ecological Modelling* [en ligne], 221, 6, pp. 944-952, URL : <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.12.006>
- Liu, G., Z. Yang, B. Chen, L. Zhang, Y. Zhang et M. Su, 2015, An Ecological Network Perspective in Improving Reserve Design and Connectivity : A Case Study of Wuyishan Nature Reserve in China, *Ecological Modelling* [en ligne], 306, pp. 185-194, URL : <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.10.004>
- Longcore, T., H.L. Aldern, J.F. Eggers, S. Flores, L. Franco, E. Hirshfield-Yamanishi, L.N. Petrinec, W.A. Yan et A.M. Barroso, 2015, Tuning the white light spectrum of light emitting diode lamps to reduce attraction of nocturnal arthropods, *Philosophical Transactions of the Royal Society* [en ligne], 370, 1667, URL : <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0125>

Lyytimäki, J., 2013, Nature's nocturnal services : Light pollution as a non-recognised challenge for ecosystem services research and management, *Ecosystem Services* [en ligne], 3, pp. 44-48, URL : <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.12.001>

Losey, G.S., T.W. Cronin, T.H. Goldsmith, D. Hyde, N.J. Marshall, N. McFarland et F. Terrasson, 1999, The UV visual world of fishes : a review, *Journal of Fish Biology* [en ligne], 54, 5, pp. 921-943, URL : <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1999.tb00848.x>

Marcantonio, M., S. Pareeth, D. Rocchini, M. Metz, C.X. Garzon-Lopez et M. Neteler, 2015, The integration of Artificial Night-Time Lights in landscape ecology : A remote sensing approach, *Ecological Complexity* [en ligne], 22, pp. 109-120, URL : <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2015.02.008>

Mauck, B., N. Glaser, W. Schlosser et G. Dehnhardt, 2008, Harbour seals (*Phoca vitulina*) can steer by the stars, *Animal Cognition* [en ligne], 11, 4, pp. 715-718, URL : <https://doi.org/10.1007/s10071-008-0156-1>

Mouritsen, H. et O.N. Larsen, 2001, Migrating songbirds tested in computer-controlled Emlen funnels use stellar cues for a time-independent compass, *Journal of Experimental Biology*, 204, pp. 3855-3865.

Musters, C.J.M., D.J. Snelder et P. Vos, 2009, The Effects of Coloured Light on Nature : A Literature Study of the Effects of Part of the Spectrum of Artificial Light on Species and Communities, Institute of Environmental Sciences, Leiden University, 43 p.

Nakamura, T. et S. Yamashita, 1997, Photoactive behaviour of nocturnal and diurnal spiders : negative and positive photoaxes, *Zoological Science* [en ligne], 14, pp. 199-203, URL : <https://doi.org/10.2108/zsj.14.199>

Opdam P., E. Steingröver et S. Van Rooij, 2006, Ecological networks : A spatial concept for multi-actor planning of sustainable landscapes, *Landscape and Urban Planning* [en ligne], 75, 3-4, pp. 322-332, URL : <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.015>

Orlowski, J., W. Harmening et H. Wagner, 2012, Night vision in barn owls : Visual acuity and contrast sensitivity under dark adaptation, *Journal of Vision* [en ligne], 12, 4, pp. 1-8, URL : <https://doi.org/10.1167/12.13.4>

Pageaud, D. et A. Lévêque, 2012, La part de superficie en sites Natura 2000, Commissariat général au développement durable, Service de l'observation et des statistiques, Paris, France, 3 p.

Pawson, S.M. et M.K.F. Bader, 2014, LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature, *Animal Behavior* [en ligne], 24, 7, pp. 1561-1568, URL : <https://doi.org/10.1890/14-0468.1>

Peña-García, A., A. Hurtado et M.C. Aguilar-Luzon, 2015, Impact of public lighting on pedestrians' perception of safety and well-being, *Safety Science* [en ligne], 78, pp. 142-148, URL : <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.04.009>

Perkin, E.K., F. Holker et K. Tockner, 2014, The effects of artificial lighting on adult aquatic and terrestrial insects, *Freshwater Biology* [en ligne], 59, 2, pp. 368-377, URL : <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2004.03.020>

Perkin, E.K., F. Holker, J.S. Richardson, J.P. Sadler, C. Wolter et K. Tockner, 2011, The influence of artificial light on stream and riparian ecosystems : questions, challenges, and perspectives, *Ecosphere* [en ligne], 2, 11, 16 p., URL : <https://doi.org/10.1890/ES11-00241.1>

Picchi, M.S., L. Avolio, A. Azzani, O. Brombin et G. Camerini, 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, 17, 4, pp. 797-805, URL : <https://doi.org/10.1007/s10841-013-9562-z>

Pino, J. et J. Marull, 2012, Ecological networks : Are they enough for connectivity conservation ? A case study in the Barcelona Metropolitan Region (NE Spain), Land Use Policy, 29, pp. 684-690, URL : <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.11.004>

Prugh, L.R. et C.D. Golden, 2014, Does moonlight increase predation risk ? Meta-analysis reveals divergent responses of nocturnal mammals to lunar cycles, Journal of Animal Ecology, 83, 2, pp. 504-514, URL : <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12148>

Raap, T., R. Pinxten et M. Eens, 2015, Light pollution disrupts sleep in free-living animals, Scientific Reports [en ligne], 5, 13557, URL : <https://doi.org/10.1038/srep13557>

Rich, C. et T. Longcore, 2006, Ecological consequences of artificial night lighting, Island Press, Washington, D.C., USA, 458 p.

Riley, W.D., P.I. Davison, D.L. Maxwell et B. Bendall, 2013, Street lighting delays and disrupts the dispersal of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fry, Biological Conservation [en ligne], 158, pp. 140-146, URL : <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.09.022>

Riley, W.D., P.I. Davison, D.L. Maxwell, R.C. Newman et M.J. Ives, 2015, A laboratory experiment to determine the dispersal response of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fry to street light intensity, Freshwater Biology [en ligne], 60, 5, pp. 1016-1028, URL : <https://doi.org/10.1111/fwb.12568>

Riou, S. et K.C. Hamer, 2008, Predation risk and reproductive effort : impacts of moonlight on food provisioning and chick growth in Manx shearwaters, J. Animal behavior [en ligne], 76, 5, pp. 1743-1748, URL : <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2008.08.012>

Saldaña-Vazquez, R.A. et M.A. Munguia-Rosas, 2013, Lunar phobia in bats and its ecological correlates : A meta-analysis, Mammalian Biology [en ligne], 78, 3, pp. 216-219, URL : <https://doi.org/10.1016/j.mambio.2012.08.004>

Schoeman, M.C., 2015, Light pollution at stadiums favors urban exploiter bats, Animal Conservation [en ligne], 19, 2, pp. 120-130, URL : <https://doi.org/10.1111/acv.12220>

Sekercioglu, C.H., 2009, Tropical Ecology : Riparian Corridors Connect Fragmented Forest Bird Populations, Current Biology [en ligne], 19, 5, pp. 210-213, URL : <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.01.006>

Siblet, J.P., 2008, Impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité, Synthèse bibliographique, Muséum national d'Histoire naturelle. Paris, France, 30 p.

Sordello, R., L. Billon, J. Amsallem et S. Vanpeene, 2017, Bilan technique et scientifique des Schémas régionaux de cohérence écologique. Méthodes d'identification des composantes de la TVB, Centre de ressources Trame verte et bleue, Paris, France, 103 p.

Sordello, R., S. Vanpeene, C. Azam, C. Kerbirou, I. Le Viol et T. Le Tallec, 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, Paris, France, 31 p.

Stone, E.L., G. Jones et S. Harris, 2012, Conserving energy at a cost to biodiversity ? Impacts of LED lighting on bats, Global Change Biology, 18, pp. 2458-2465, URL : <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02705.x>

Swaddle, J.P., C.D. Francis, J.R. Barber, C.B. Cooper, C.C.M. Kyba, D.M. Dominoni, G. Shannon, E. Aschenoug, S.E. Goodwin, A.Y. Kawahara, D. Luther, K. Spoelstra, M. Voss et T. Longcore, 2015, A

framework to assess evolutionary responses to anthropogenic light and sound, *Trends in Ecology & Evolution* [en ligne], 30, 9, pp. 550-556, URL : <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.06.009>

Smolk, J., E. Baird, B. El Jundi, T. Reber, M.J. Byrne et M. Dacke, 2016, Night sky orientation with diurnal and nocturnal eyes : dim-light adaptations are critical when the moon is out of sight, *Animal Behaviour* [en ligne], 111, pp. 127-146, URL : <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2015.10.005>

Telfer, T.C., J.L. Sincock, G.V. Byrd et J.R. Reed, 1987, Attraction of Hawaiian seabirds to lights : conservation efforts and effect of moon phase, *Wildlife Society Bulletin*, 15, 3, pp. 406-413.

Threlfall, C.G., B. Law et P.B. Banks, 2013, The urban matrix and artificial light restricts the nightly ranging behaviour of Gould's long-eared bat (*Nyctophilus gouldi*), *Austral Ecology* [en ligne], 38, 8, pp. 921-930, URL : <https://doi.org/10.1111/aec.12034>

Thums, M., S.D. Whiting, J. Reisser, K.L. Pendoley, C.B. Pattiaratchi, M. Proietti, Y. Hetzel, R. Fisher et M.G. Meekan, 2016, Artificial light on water attracts turtle hatchlings during their near shore transit, *Royal Society Open Science* [en ligne], 3, 160142, URL : <https://doi.org/10.1098/rsos.160142>

Urbanski, J., M. Mogi, D. O'Donnell, M. Decotiis, T. Toma et P. Armbruster, 2012, Rapid adaptive evolution of photoperiodic response during invasion and range expansion across a climatic gradient, *The American Naturalist* [en ligne], 179, 4, pp. 490-500, URL : <https://doi.org/10.1086/664709>

Valls-Gabaud, D., 2009, Réserve Starlight - Concept, Dimensions, Catégories, Critères, Recommandations, Version française par Alain Le Gué, [en ligne] URL : <http://www.starlight2007.net/pdf/ReserveStarlightfr.pdf>

Van Dyke, J.U. et M.S. Grace, 2010, The role of thermal contrast in infrared-based defensive targeting by the copperhead, *Agkistrodon contortrix*, *Animal Behaviour* [en ligne], 79, 5, pp. 993-999, URL : <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2010.01.012>

Van Geffen, K.G., E. Van Eck, R.A. De Boer, H.A. Van Grunsven, L. Salis, F. Berendse et E.M. Veenendaal, 2015, Artificial light at night inhibits mating in a Geometrid moth, *Insect Conservation and Diversity* [en ligne], 8, 3, pp. 282-287, URL : <https://doi.org/10.1111/icad.12116>

Van Grunsven, R.H.A., R. Creemers, K. Joosten, M. Donners et E.M. Veenendaal, 2017, Behaviour of migrating toads under artificial lights differs from other phases of their life cycle, *Amphibia-Reptilia* [en ligne], 38, pp. 49-55, URL : <https://doi.org/10.1163/15685381-00003081>

Vanpeene, S., R. Sordello, J. Amsallem et L. Billon, 2017, Bilan technique et scientifique des Schémas régionaux de cohérence écologique. Méthodologies d'identification des obstacles et d'attribution des objectifs, Centre de ressources TVB, Paris, France, 88 p.

Veilleux, C.C. et M.E. Cummings, 2012, Nocturnal light environments and species ecology : implications for nocturnal color vision in forests, *Journal of Experimental Biology* [en ligne], 215, pp. 4085-4096, URL : <https://doi.org/10.1242/jeb.071415>

Walker C., C. Bueter, A. Hurst, V. White, M. Berendsen et K. Patten, 2017, GLOBE at Night : Using Sky Quality Meters to Measure Sky Brightness. National Optical Astronomy Observatory, Nightwise.org, Astronomy from the Ground Up, Night Sky Network, International Dark-Sky Association, [en ligne] URL : <https://www.globeatnight.org/sqm.php>

Warrant, E.J. et S. Johnsen, 2013, Vision and the light environment, *Current Biology* [en ligne], 23, 22, pp. 990-994, URL : <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.10.019>

Watling, J.I., A.J. Nowakowski, M.A. Donnelly et J.L. Orrock, 2011, Meta-analysis reveals the importance of matrix composition for animals in fragmented habitat, *Global Ecology and Biogeography* [en ligne], 20, pp. 209-217, URL : <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00586.x>

Wiltschko, R. et W. Wiltschko, 1977, Relative Importance of Stars and the Magnetic Field for the Accuracy of Orientation in Night-Migrating Birds, *Oikos*, 30, 2, dans : *Current Bird Migration Research, Proceedings of a Symposium at Falsterbo, Sweden, 3-8 October, 1977*, pp. 195-206, [en ligne] URL : <https://doi.org/10.2307/3543479>

Zeller, K.A., K. McGarigal et A.R. Whiteley, 2012, Estimating landscape resistance to movement : a review, *Landscape Ecology* [en ligne], 27, pp. 777-797, URL : <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9737-0>

Zollner, P.A. et S.L. Lima, 1999, Illumination and the perception of remote habitat patches by white-footed mice, *Ecological Applications* [en ligne], 58, 3, pp. 489-500, URL : <https://doi.org/10.1006/anbe.1999.1186>

RÉSUMÉS

Face aux phénomènes de disparition et de fragmentation des habitats, le développement de réseaux écologiques, c'est-à-dire de milieux naturels interconnectés, est une solution largement préconisée par la littérature. Or depuis peu, la lumière artificielle nocturne est reconnue comme une source nouvelle de fragmentation. Effectivement, l'éclairage nocturne altère les déplacements de la faune et dégrade la qualité des habitats utilisés par la biodiversité nocturne. Un effet barrière net est aussi mis en évidence pour certains animaux incapables de franchir les ruptures du noir engendrées par la lumière. L'intégration de cette problématique dans les réseaux écologiques est donc nécessaire, mais celle-ci pose des questions nouvelles pour les acteurs opérationnels. Cet article propose ainsi des pistes méthodologiques pour prendre en compte la pollution lumineuse dans les réseaux écologiques. Selon les étapes du processus, la pollution lumineuse peut être traitée lors de l'identification même des éléments du réseau (nœuds, liens), lors de la localisation de zones de conflits provoquées par la lumière artificielle sur le réseau ou encore par l'intermédiaire d'actions de gestion de l'éclairage. En outre, cet article propose une première réflexion sur les paramètres d'éclairage à considérer. La pollution lumineuse se traduit en effet par différents phénomènes qu'il est nécessaire de traduire en métriques, à la fois quantitatives (ex. : niveaux d'éclairement) et qualitatives (ex. : spectres), cartographiables pour les réseaux écologiques. Un travail doit aussi être mené pour dresser une liste d'espèces cibles particulièrement sensibles à la lumière nocturne, permettant de définir des seuils de bascules à considérer pour les réseaux écologiques.

In response to habitat fragmentation, scientific literature recommends ecological networks, which are natural areas interconnected structurally and functionally. Recently, artificial light at night (ALAN) is recognized as a new cause of habitat fragmentation. Indeed, light pollution modifies animal mobility and degrades quality of habitats used by biodiversity at night. It can be also a real barrier for some species that are not able to cross lighting areas. All those impacts imply that light pollution be integrated into ecological networks but this need raises new questions for practitioners. This article proposes some solutions to planify ecological networks integrating light pollution, from their building to their implementation. ALAN can be covered at different steps of the process : 1) to design a dark ecological network (cores and corridors), 2) to locate conflictual zones between green infrastructure and lightings or even 3) to plan actions to reduce light pollution in the ecological network. This article proposes also first indications about lighting parameters that have to be considered in an ecological network for biodiversity. Indeed,

light pollution causes several kinds of problems to biodiversity that have to be translated into quantitative and qualitative variables - and next into maps - for ecological networks. Furthermore, a list of species that are particularly sensitive to ALAN should be provided to determine switching thresholds for ecological networks.

INDEX

Keywords : green infrastructure, light pollution, corridors, artificial light at night, habitat fragmentation

Mots-clés : éclairage nocturne, lumière artificielle, trame verte et bleue, trame noire, corridors, fragmentation des habitats, biodiversité nocturne

AUTEUR

ROMAIN SORDELLO

Chef de projet Trame verte et bleue, Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle, 61, rue Buffon, Chez le CBNBP - CP53, 75005 PARIS, France, courriel : sordello@mnhn.fr