

Construire des indicateurs nationaux sur la pollution lumineuse

Réflexion préliminaire

**Romain SORDELLO, Clémentine AZAM, Jennifer
AMSALLEM, Yves BAS, Lucille BILLON, Samuel
BUSSON, Samuel CHALLEAT, Christian KERBIRIOU,
Isabelle LE VIOL, Bastien NGUYEN DUY - BARDAKJI,
Sébastien VAUCLAIR, Paul VERNY**

Avril 2018 - N°2018-107

Unité Mixte de Service Patrimoine Naturel

Nom du Programme/Projet : Pollution lumineuse / Trame verte et bleue

Chef de projet/Premier auteur : Romain Sordello, Chef de projet « pollution lumineuse », UMS Patrinat

Co-auteurs/Contributeurs : Jennifer Amsallem (Irstea), Clémentine Azam (ONF ex-MNHN), Yves Bas (CESCO), Lucille Billon (UMS Patrinat), Samuel Busson (Cerema), Samuel Challéat (CNRS, coordinateur du Collectif Rénor), Christian Kerbiriou (CESCO), Isabelle Le Viol (CESCO), Bastien NGuyen Duy - Bardakji, (IRD), Sébastien Vaclair (DarkSkyLab), Paul Verny (Cerema)

Autres relecteurs : Katia Hérard (UMS Patrinat), Yorick Reyjol (UMS Patrinat), Sylvie Vanpeene (Irstea)

Référence du rapport conseillée : Sordello R. (coord.), Amsallem J., Azam C., Bas Y., Billon L., Busson S., Challéat S., Kerbiriou C., Le Viol I., N'Guyen Duy-Bardakji B., Vaclair S., Verny P. (2018). *Construire des indicateurs nationaux sur la pollution lumineuse. Réflexion préliminaire*. UMS PatriNat, Cerema, CESCO, DarkSkyLab, IRD, Irstea. 47 pages.



L'UMS Patrimoine naturel

Centre d'expertise et de données sur la nature



Depuis janvier 2017, l'Unité Mixte de Service 2006 Patrimoine naturel assure des missions d'expertise et de gestion des connaissances pour ses trois tutelles, que sont le Muséum national d'Histoire naturelle, l'Agence française pour la biodiversité et le CNRS.

Son objectif est de fournir une expertise fondée sur la collecte et l'analyse de données de la biodiversité et de la géodiversité, et sur la maîtrise et l'apport de nouvelles connaissances en écologie, sciences de l'évolution et anthropologie. Cette expertise, fondée sur une approche scientifique, doit contribuer à faire émerger les questions et à proposer les réponses permettant d'améliorer les politiques publiques portant sur la biodiversité, la géodiversité et leurs relations avec les sociétés et les humains.

En savoir plus : patrinat.mnhn.fr/

Directeur : Jean-Philippe SIBLET

Directeur adjoint en charge du centre de données : Laurent PONCET

Directeur adjoint en charge des rapportages et de la valorisation : Julien TOUROULT

Inventaire National du Patrimoine Naturel



Porté par l'UMS Patrimoine naturel, 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 consolider des informations qui étaient jusqu'à présent dispersées. Il concerne la métropole et l'outre-mer, aussi bien la partie terrestre que marine. C'est une contribution majeure pour la connaissance naturaliste, l'expertise, la recherche en macroécologie et l'élaboration de stratégies de conservation efficaces du patrimoine naturel.

En savoir plus : inpn.mnhn.fr

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| I. INTRODUCTION | 5 |
| II. INDICATEURS DE PRESSION | 7 |
| A. Initiatives existantes | 8 |
| B. Les différentes formes de pollution lumineuse pour la biodiversité | 8 |
| 1. Lumière « directe » | 8 |
| 2. Lumière « précise » | 11 |
| 3. Lumière « ambiante/projetée » | 12 |
| 4. Lumière « diffuse » | 13 |
| C. Composition de la lumière | 16 |
| D. Temporalité de l'éclairage | 19 |
| E. Récapitulatif sur les indicateurs de pression | 19 |
| 1. Récapitulatif des formes de pollution lumineuse et des grandeurs d'éclairages associées | 19 |
| 2. Récapitulatif des sources de données « pression » | 20 |
| 3. Récapitulatif des potentiels indicateurs de pression | 21 |
| 4. Formes de rendu des indicateurs | 22 |
| III. INDICATEURS D'ETAT | 23 |
| A. Identifier des espèces cibles | 24 |
| 1. Les chiroptères | 24 |
| 2. Les insectes nocturnes | 25 |
| 3. Autres espèces potentielles | 26 |
| B. Disponibilité en données | 27 |
| 1. Besoins et contraintes | 27 |
| 2. Programmes de Sciences participatives mobilisables | 27 |
| IV. INDICATEURS DE REPONSE | 29 |
| A. Réponses de types « aménagement/planification » | 30 |
| 1. La création d'aires protégées dédiées à la qualité de l'environnement nocturne | 30 |
| 2. Le nombre de schémas prenant en compte la problématique de la pollution lumineuse pour la biodiversité | 31 |
| i. Les schémas régionaux de la trame verte et bleue | 31 |
| ii. Les plans/schémas des espaces naturels | 33 |
| iii. Les plans/schémas de planification de la lumière | 34 |
| 3. La réalisation de trames noires | 34 |
| B. Réponses de types gestion de l'éclairage | 36 |
| 1. Dimension temporelle | 36 |
| 2. Sources lumineuses | 37 |
| C. Récapitulatif des indicateurs de réponse proposés | 37 |
| V. CONCLUSIONS & PERSPECTIVES | 39 |
| VI. REFERENCES CITEES | 41 |

I. Introduction

L'éclairage artificiel nocturne s'est considérablement déployé à la surface du globe et particulièrement en Europe ces dernières années (Kyba *et al.*, 2017 ; Falchi *et al.*, 2016 ; Bennie *et al.*, 2015). Celui-ci génère une **pollution lumineuse** qui engendre des conséquences dans de nombreux domaines (consommations énergétiques, santé/sommeil, astronomie, biodiversité, ...).

Dans le domaine de la **biodiversité**, des impacts forts existent et concernent la faune (Siblet, 2008 ; Longcore & Rich, 2004) comme la flore (Bennie *et al.*, 2016) et tous les milieux naturels (terrestres, aquatiques, marins). La lumière artificielle nocturne agit aux différentes échelles du vivant, des individus aux paysages. Notamment, elle cause une mortalité directe en créant des pièges écologiques (Longcore *et al.*, 2013). Elle dégrade la qualité de l'habitat des espèces animales (Picchi *et al.*, 2013). Elle perturbe le cycle d'espèces végétales en ville (Ffrench-Constant *et al.*, 2016). Elle déséquilibre les relations interspécifiques telles que les rapports proie-prédateurs (Minnaar *et al.*, 2014) ou la pollinisation (Knop *et al.*, 2017). Elle est une source de fragmentation des habitats nocturnes (Van Grunsven *et al.*, 2017) et elle modifie les communautés (Plummer *et al.*, 2016). Elle peut contraindre l'aire de répartition de certaines espèces (Azam *et al.*, 2016) et semble être à l'origine d'une diminution des services rendus par les écosystèmes (Lewanzik & Voigt, 2014). La littérature sur ces impacts est aujourd'hui abondante, avec une recherche mondiale en forte augmentation depuis 10 à 15 ans dans le domaine de l'écologie¹.

Dans le contexte actuel de forte érosion de biodiversité, les sociétés ont besoin de métriques fiables sur les pressions qu'elles exercent sur la biodiversité de par leurs activités. Elles doivent également connaître l'état de la biodiversité et son évolution sous l'effet de ces pressions. Enfin, elles doivent pouvoir vérifier dans quelle mesure les réponses adoptées (politiques, opérationnelles, ...) pour lutter contre cette érosion de la biodiversité sont, d'une part, réellement mises en œuvre et, d'autre part, réellement efficaces. Pour répondre à ces différents besoins, une approche classique repose sur la production de **jeux d'indicateurs** qui ont vocation à la fois à éclairer le débat en amont des décisions et à suivre leurs effets en aval.

En ce qui concerne la pollution lumineuse, il n'existe actuellement pas de tels jeux d'indicateurs à l'échelle nationale. Il n'est donc pas possible, à l'échelle nationale, de suivre et d'évaluer le comportement de la biodiversité en réaction à l'éclairage artificiel nocturne, ni de mesurer l'efficacité des initiatives (politiques publiques, planification et gestion de l'éclairage, ...) pour réduire ces nuisances sur la biodiversité, ni même d'en suivre l'évolution sur la biodiversité.

Pourtant, la lutte contre les nuisances lumineuse vis-à-vis de la flore et de la faune dispose, depuis les lois Grenelle de 2010/2011, d'une assise législative et réglementaire qui a été renforcée par la loi dite « Biodiversité » de 2016. Il est donc important de pouvoir évaluer l'efficacité de ce dispositif. L'ensemble des acteurs (éclairagistes, collectivités, ...) s'emparent à leur tour de ce sujet avec la volonté de pouvoir s'assurer que leurs actions permettent d'améliorer la situation.

La « Stratégie Connaissances » produite par l'UMS Patrinat en 2017 a mis en évidence l'absence de données exploitables au niveau national sur la pollution lumineuse (Touroult *et al.* 2017, Tome I, Tableau 9 p78). Ce constat s'exprime explicitement aussi à l'échelle régionale puisque quatre Schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE, soit 20 % d'entre eux) ont mentionné le besoin de développer des indicateurs de suivi et d'évaluation de leur SRCE sur les aspects de pollution lumineuse (Sordello, 2015).

Dans ce contexte, l'**Unité Mixte de Service Patrimoine naturel** (UMS Patrinat AFB/CNRS/MNHN, anciennement le Service du patrimoine naturel du MNHN) a engagé une première réflexion dans la perspective de construire des indicateurs nationaux liés à la pollution lumineuse. Ces indicateurs devront permettre d'alimenter

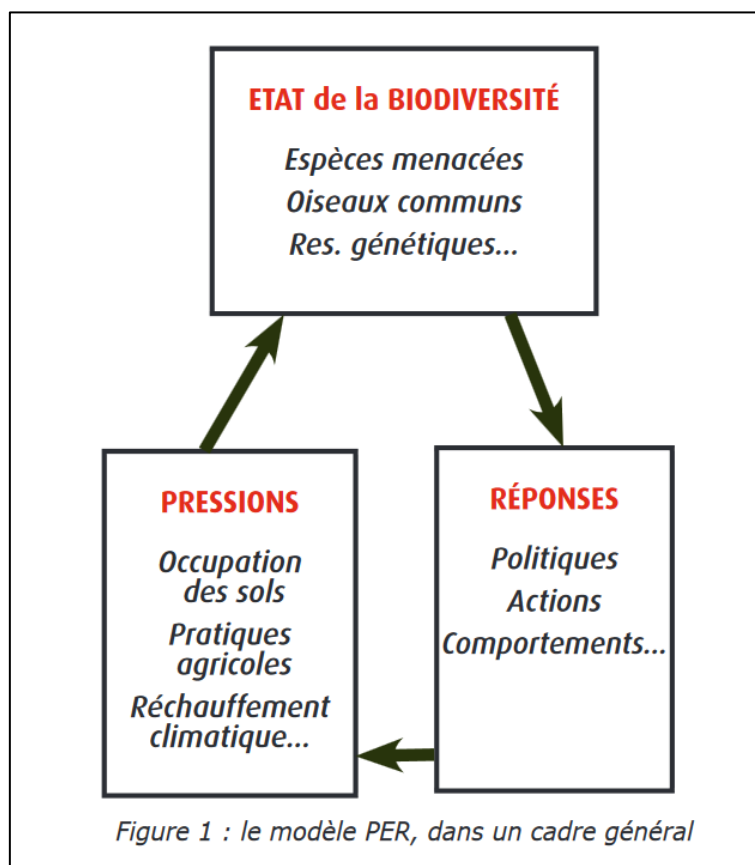
¹ Voir ici : <http://nuitfrance.fr/?page=donneesdoc&partie=bibliometrie>

l'Observatoire national de la biodiversité (ONB)². Le cas échéant, ils pourraient aussi être transposables à des échelles régionale ou locale. Dans cette démarche, l'UMS Patrinat s'est entourée d'un collectif d'acteurs scientifiques et techniques, experts du sujet pollution lumineuse (Cerema, CESCO, CNRS (Collectif Renoir), DarkSkyLab, Irstea).

Pour mener cette réflexion, nous avons adopté le cadre conceptuel du **modèle P-E-R**³ préconisé par l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE) et adapté à la biodiversité (Levrel *et al.*, 2009). Cette démarche repose sur trois grands types d'indicateurs :

- des indicateurs de **pression** : il s'agit de mesurer factuellement la pression à laquelle on s'intéresse et qui pèse sur la biodiversité,
- des indicateurs d'**état** : il s'agit de mesurer l'état de la biodiversité en réaction à cette pression,
- des indicateurs de **réponse** : il s'agit de mesurer les réponses de la société au sens large (politiques, comportements, projets, ...) mises en œuvre pour réduire la pression et ses effets sur la biodiversité.

La démarche proposée ici reprend donc les trois items, **Pression - Etat - Réponse**, avec l'objectif à terme de proposer un ou plusieurs indicateurs pour chacun d'eux.



Source : Couvet *et al.*, 2008

Le présent document constitue une pré-étude qui vise à amorcer ce travail sur les indicateurs de pollution lumineuse en mettant par écrit des premiers éléments de réflexion et des propositions, à mettre en débat et à approfondir.

² L'Observatoire national de la biodiversité (ONB) est un projet participatif, piloté depuis le 1 septembre 2017 par l'AFB, ouvert à tous les acteurs intéressés par la production d'informations précises et documentées sur la biodiversité en France et ses interactions avec la société française.

³ NB : L'Agence Européenne de l'Environnement utilise quant à elle un modèle en cinq compartiments, dit « DPSIR » (Driving forces, Pressures, State, Impact, Responses) (EEA, 1998). Ce modèle, plus complexe n'a pas été retenu ici mais pourra être exploré si besoin dans un second temps.

II. Indicateurs de pression



La question à laquelle on souhaite ici répondre est : « *Quelles sont les caractéristiques de la pollution lumineuse à l'échelle nationale (quantité/qualité de la lumière) et comment évoluent-elles, de manière factuelle ?* »

A. Initiatives existantes

A ce jour il n'existe pas d'indicateur de « pression » sur l'éclairage nocturne à l'échelle nationale. Il existe en revanche des cartes de pollution lumineuse nationales ou même mondiales. Ces cartes sont produites essentiellement dans un but astronomique et leur échelle de graduation reflète la vision du ciel nocturne (ex : Falchi *et al.*, 2016). Or, si les enjeux d'observation du ciel étoilé peuvent rejoindre la problématique des impacts de la lumière sur la biodiversité (pour les espèces utilisant le ciel nocturne comme repère : oiseaux en migration, mammifères marins, insectes, ...), cela ne reflète qu'une partie des enjeux de biodiversité.

En outre, ces cartes sont certes construites à partir de données brutes mais celles-ci ne relèvent pas directement de la lumière artificielle. Elles nécessitent donc une interpolation dont les inférences ne sont pas toujours explicitées ou robustes. Par exemple, certaines cartes utilisent l'occupation du sol (urbanisation) ou la densité de population humaine comme données d'entrées en partant du principe que la pollution lumineuse est un phénomène connexe à l'urbanisation et qu'elle peut donc être déduite de la « concentration urbaine ». Ces cartes ne permettent donc pas de tenir compte des politiques locales d'extinction nocturne ou des caractéristiques locales des parcs d'éclairages. Si ces cartes sont utiles dans un objectif de communication et de sensibilisation, y compris à l'échelle nationale, elles ne peuvent pas être mobilisées pour alimenter des indicateurs robustes basés sur une démarche scientifique et opérationnelle.

Sur la base de ce constat, il paraît donc nécessaire ici de mener une réflexion sur des indicateurs de pressions qui tentent de prendre en compte la complexité du phénomène de pollution lumineuse spécifiquement vis-à-vis de la biodiversité.

En effet, vis-à-vis de la biodiversité, la pollution lumineuse prend de multiples formes (lumière intrusive, halo lumineux, ...). Par ailleurs, les impacts sur la biodiversité peuvent être liés aussi bien à la quantité de lumière qu'à sa composition ou encore être déterminés par la répartition de l'éclairage dans l'espace et le temps. De plus, une combinaison de 2 ou 3 de ces facteurs peut aussi provoquer d'autres effets. Il est donc important de parcourir ces différentes facettes du phénomène de pollution lumineuse, dans la perspective de produire un - ou plus vraisemblablement plusieurs - indicateur(s) permettant de traduire le problème de la manière la plus complète possible.

B. Les différentes formes de pollution lumineuse pour la biodiversité

Les différentes formes de pollution lumineuse vis-à-vis de la biodiversité peuvent être décrites à travers une typologie en quatre grands effets dus à de la lumière « directe », « précise », « ambiante/projetée » ou encore « diffuse » (Sordello, 2017b).

1. Lumière « directe »

L'alternance naturelle jour/nuit qui rythme la vie sur Terre depuis des milliards d'années a constitué un paramètre très structurant pour l'évolution du vivant (Gerrish *et al.*, 2009). Rappelons qu'environ 30 % des vertébrés et 65 % des invertébrés sont en tout ou partie nocturnes (Holker *et al.*, 2010). Des adaptations biologiques ou morphologiques sont apparues et permettent à ces animaux de vivre la nuit c'est-à-dire dans un environnement fortement obscur (ex : Warrant, 2004). Certaines espèces possèdent ainsi de gros yeux ou davantage de cellules photoréceptrices, pour optimiser le peu de lumière présent naturellement la nuit. Ces systèmes de vision sont donc très sensibles à la lumière et peuvent rapidement être saturés. Par conséquent, un premier volet du problème est cette « lumière directe » pénétrant dans les yeux des espèces photosensibles et pour lesquelles un point lumineux artificiel est potentiellement une **source d'éblouissement** (Rich & Longcore, 2006).



Figure 1 : L'éclairage peut être source d'éblouissement, en particulier pour les espèces nocturnes dont le système de vision est adapté à la pénombre

Crédit : R. Sordello

Le problème posé ici est lié à la **quantité de lumière émise**. En éclairagisme, on distingue à ce sujet plus particulièrement deux grandeurs (cf. Figure 2, page 10) :

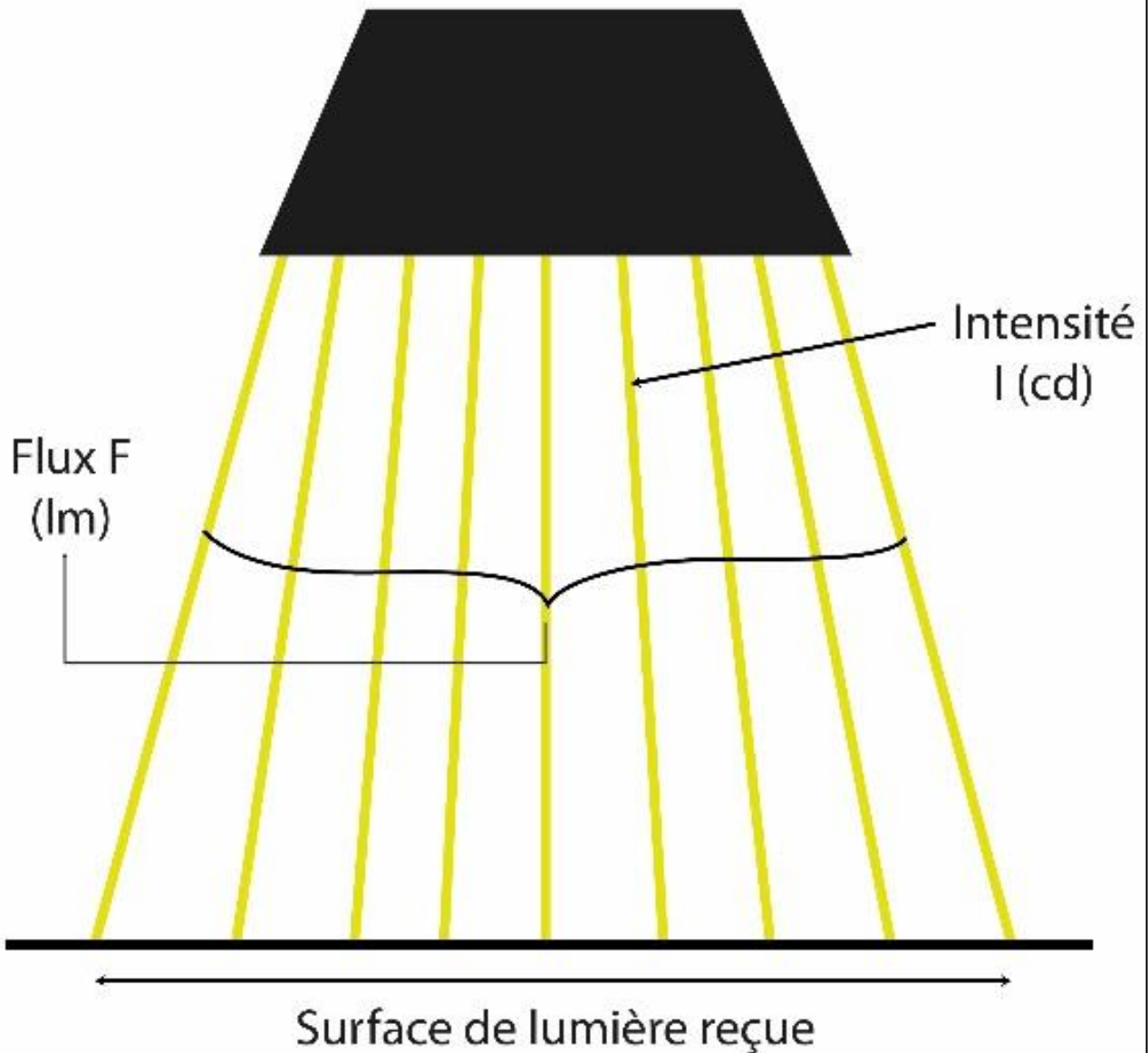
- l'**intensité lumineuse** qui exprime la lumière émise dans une direction (en candela, cd),
- le **flux lumineux** qui exprime la quantité de lumière émise par l'ensemble du faisceau lumineux, c'est-à-dire la somme des intensités (en lumen, lm).

Plus la quantité de lumière émise sera grande, plus l'éblouissement sera potentiellement fort. Cependant, l'éblouissement est également dépendant de la surface émettrice de lumière. La grandeur appropriée pour traduire la sensation d'éblouissement est alors la **luminance** (en cd.m^{-2}) qui représente l'intensité lumineuse rapportée à la surface d'émission de la lumière. Plus il y a de lumière émise (intensité forte) et plus la surface d'émission est petite, plus la luminance perçue par l'œil, et donc l'éblouissement, sont forts.

Les risques d'éblouissement pour la faune par les éclairages artificiels sont à ce jour très peu étudiés et encore moins *in-situ*. Il s'agit néanmoins d'un sujet important, notamment en lien avec la tendance actuelle de conversion de l'éclairage public vers les LED. Ces sources lumineuses possèdent une luminance beaucoup plus forte que les éclairages actuels (lampes à décharge, à vapeur de Sodium par exemple) à quantité de lumière équivalente, du fait de leur petite surface d'émission (s'agissant de composants électroniques). Des études sur l'augmentation des nuisances lumineuses par éclairage LED pour les usagers sont également de plus en plus nombreuses (Lin *et al.*, 2014).

Le flux est une variable donnée par les constructeurs de matériel d'éclairage et la luminance se mesure au sol à l'aide d'un luminancemètre. **En conclusion, un indicateur basé sur ces variables paraît relativement difficile à envisager à l'échelle nationale du fait de l'accès à ces données à grande échelle. En revanche, il pourrait être valable pour une échelle locale.**

GRANDEURS DE L'ÉCLAIRAGE



$$\text{Luminance} = I / \text{Surface} \Rightarrow \text{cd/m}^2$$

$$\text{Éclairage } E = F / \text{Surface} \Rightarrow \text{lm/m}^2 = \text{lux}$$

Figure 2 : Quatre principales grandeurs de quantité de lumière utilisées en éclairagisme
La surface évoquée peut être aussi bien celle qui émet la lumière que celle qui la reçoit.

Crédit : R. Sordello

2. Lumière « précise »

Certains animaux nocturnes présentent un phototactisme positif c'est-à-dire qu'ils sont spontanément attirés vers les sources de lumière (ex : Thums *et al.*, 2016 ; Le Corre *et al.*, 2002). Cela s'explique par le fait que dans une nuit naturelle, ces animaux se repèrent par rapport aux structures naturellement lumineuses (étoiles, Lune, autres organismes bioluminescents, contraste terre/mer, ...) (ex : Dacke *et al.*, 2013 ; Mauck *et al.*, 2008). Pour ces animaux, les points lumineux artificiels constituent donc des pièges écologiques car une fois attirés par ces derniers ils sont généralement condamnés à mourir (par épuisement, surchauffe, prédation, ...). A minima, ils sont désorientés/écartés de leurs trajets. On connaît ce phénomène chez les insectes, les tortues marines, les oiseaux marins ou encore les oiseaux en migration (mortalité massive au pied des tours éclairées, phares maritimes, ...) (ex : Justice & Justice, 2016 ; Longcore *et al.*, 2013). En conséquence, chaque point lumineux, constituant une source « précise » de lumière, possède un pouvoir attractif sur de nombreuses espèces. Cette attraction peut s'effectuer à une distance importante du point lumineux (a priori plusieurs centaines de mètres voire plus) et à des niveaux de lumière très faibles.



Figure 3 : Un point lumineux placé dans l'environnement nocturne possède un pouvoir d'attraction sur les espèces qui possèdent un phototactisme positif. Ce phénomène crée des pièges écologiques et déstabilise les rapports proies/prédateurs.

Crédit : R. Sordello

Pour quantifier ce phénomène de lumière « précise », **le nombre ou la densité de points lumineux sur un territoire** peut déjà constituer en soi un indicateur intéressant, au regard du pouvoir attractif que chacun d'eux possède sur les animaux. Les caractéristiques des luminaires restent également très importantes, notamment leur orientation, leur configuration / installation (encastrés ou pas, à l'horizontale ou pas, avec vasque bombée ou pas, etc.) vont influencer sur la perception à distance ou pas du point lumineux.

Plusieurs communes (ou leur syndicat d'électrification ou d'éclairage) ont d'ores et déjà effectué ce type de recensement (avec un géoréférencement des données dans le meilleur des cas) et parfois mettent à disposition ces données dans une base en libre accès (mais cela reste rare). Toutefois, pour le moment, cette information reste parcellaire pour une démarche nationale. A ce jour, il n'existe pas *a priori* de centralisation de ces données communales/régionales dans une base de données nationale.

Le nombre de 9 à 11 millions de points lumineux en France circule dans les débats mais il est peu voire pas étayé et paraît être plutôt de l'ordre d'une estimation que d'un recensement issu d'agrégation de données locales. Ce chiffre ne paraît donc pas constituer un indicateur fiable à ce stade. En outre, il ne concernerait que les éclairages publics alors même que les éclairages privés (particuliers, commerces, *etc.*) sont également source de pollution. Considérer uniquement le réseau d'éclairage public est donc problématique.

Il faut noter par contre que plusieurs structures collectent actuellement ce genre de données à large échelle. Dans certains secteurs géographiques, ces inventaires SIG des parcs d'éclairage représentent même une masse de données couvrant un large territoire au-delà de la limite communale. Par exemple, dans les Pyrénées, DarkSkyLab a rassemblé les données de plus de 90 000 points lumineux. Le Cerema dispose aussi d'inventaires pour plus de 70 % des communes des Bouches-du-Rhône (dont Aix, Marseille, Arles...). Le Var a également une large couverture ainsi que le territoire de Nice Métropole. Cela peut représenter une base de travail avec des données fournies, précises et localisées. Dans le cadre de l'observatoire PACA, le Cerema a déjà effectué des tests SIG pour établir un indicateur basé sur le nombre de points lumineux selon les tailles de communes. Il faut noter aussi que pour acquérir la labellisation « Réserve internationale de ciel étoilé » (cf. § B.4.) il est obligatoire de démontrer qu'une gestion de l'éclairage est effectuée à l'échelle de chaque point lumineux, ce qui implique un recensement de ces derniers.

Compte tenu de la montée en puissance de ces recensements de points lumineux, il est donc imaginable que d'ici deux à trois ans, il soit possible de disposer d'une couverture nationale relativement complète.

3. Lumière « ambiante/projetée »

La lumière est un facteur répulsif pour certaines espèces (phototactisme négatif). On pense que cela est dû entre autres au fait que la lumière « met en lumière » et donc surexpose à la prédation (ex : Mougeot & Bretagnolle, 2000). Cette sensibilité est très fine selon les espèces ; certains animaux diminuent voire stoppent leur activité en période de pleine Lune (ex : Prugh & Golden, 2014 ; Saldana-Vasquez & Mungula-Rosas, 2013 ; Alldredge & King, 1980). La luminosité ambiante créée par l'éclairage artificiel nocturne, bien plus grande que dans une nuit naturelle, constitue ainsi un facteur fort de dégradation de l'habitat et provoque un évitement de certaines zones (ex : Beier, 1995). On constate aussi l'évitement de zones éclairées pour d'autres raisons, notamment chez les espèces pratiquant la bioluminescence et pour lesquelles l'éclairage artificiel perturbe ainsi la communication (ex : Ineichen & Ruttimann, 2012) et donc éventuellement aussi la reproduction.

Il s'agit donc ici d'un problème de lumière/luminosité ambiante ou encore de lumière « projetée » (au sol, sur les feuillages, sur l'eau ou dans l'eau). C'est ici le fait que l'environnement soit lumineux qui pose problème, et non pas simplement la présence précise d'un point lumineux ou l'éblouissement (lumière directe).

Parmi les variables utilisées en éclairagisme, **l'éclairement** semble être celle la plus adaptée pour traduire cette notion de « lumière projetée » (cf. Figure 2, page 10). L'éclairement correspond en effet au flux lumineux rapporté à la surface éclairée et est exprimé en lumen/m², unité que l'on appelle des lux. Notons que si l'éclairement permet effectivement de mesurer la quantité de lumière reçue par une surface, par exemple au niveau du sol ou de tout élément éclairé d'intérêt (ex : trou de pic dans un arbre, sortie d'un tunnel/canalisation, entrée d'un gîte à chiroptère, *etc.*), il ne traduit pas pour autant le rendu visuel basé sur la luminance qui va dépendre ensuite de la matière qui absorbe/renvoie cette lumière incidente et de l'œil (physiologie) qui reçoit cette lumière réfléchie.



Figure 4 : La lumière projetée au sol, dans l'eau, sur les feuillages peut créer des zones évitées par certains animaux nocturnes, dégradant et fragmentant les habitats naturels

Crédit : R. Sordello

En écologie, c'est l'éclairage qui est souvent utilisé comme grandeur dans les publications scientifiques qui traitent de la lumière naturelle comme artificielle (ex : Gaston *et al.*, 2013). En revanche, la construction d'un indicateur basé sur l'éclairage paraît là-aussi compliquée. Par définition, un tel indicateur ne peut être implémenté à partir d'images prises par le haut (satellites par exemple). Il peut être alimenté uniquement par des **mesures de terrain (faites à partir d'un luxmètre) ce qui paraît difficilement faisable à une échelle nationale.**

4. Lumière « diffuse »

La lumière artificielle partant vers le ciel s'associe aux particules en suspension dans l'air ce qui forme un halo lumineux bien visible au-dessus des métropoles. Ce phénomène est accentué de surcroît par la pollution de l'air qui augmente le nombre de particules en suspension dans l'atmosphère (aérosols) (Aubé, 2015) ainsi que par la météo (nuages, brume, brouillard, ...)

Or, de nombreuses espèces utilisent le ciel étoilé comme repère la nuit (oiseaux, mammifères marins, insectes, ...) (Wiltschko *et al.*, 1987 ; Doujak, 1985 ; Wehner, 1984). Il est donc pressenti que cette forme de pollution lumineuse leur serait très préjudiciable puisqu'elle se traduit par une « chape » de lumière entre la terre et la voûte céleste, qui masque leurs repères.



Figure 5 : La lumière stagne et diffuse dans l'atmosphère par une association avec les particules en suspension, créant un halo lumineux qui masque le ciel étoilé

Crédit : P. Gourdain

La lumière émise au-dessus de l'horizontale est traduite par l'ULOR en éclairagisme (pour « Upward Light Output Ratio »). Au-delà de la configuration de la lampe qui peut être plus ou moins efficace sur ce sujet, l'orientation des luminaires est un facteur déterminant pour l'ULOR puisque, mécaniquement, plus les lampes sont inclinées vers le ciel plus la lumière est émise au-dessus de l'horizontale, ce qui favorise donc le halo lumineux. Néanmoins, les revêtements au sol contribuent aussi à réfléchir plus ou moins de lumière vers le haut (en fonction de leur composition, de leur couleur, de leur état sec ou mouillé, *etc.*) et agissent donc également sur l'ULOR⁴.

Construire un indicateur basé sur les calculs d'ULOR (orientation des lampadaires et revêtements) paraît possible à une échelle locale mais compliqué à une échelle nationale. A cette échelle il semble plus abordable de travailler directement sur une mesure du halo lumineux.

A ce sujet, il est possible d'utiliser un Sky Quality Meter (SQM) pour **mesurer la noirceur du ciel nocturne** vue depuis le sol puis évaluée sur l'échelle de Bortle. Ces mesures sont très pratiquées dans le domaine de l'astronomie. Cependant, là encore cela impliquerait des mesures très nombreuses pour aboutir à un indicateur national, incluant un calibrage qui tienne compte des divers paramètres influençant la diffusion de la lumière (humidité, présence de particules dans l'atmosphère, *etc.*). Un tel dispositif devrait sans doute s'appuyer sur un programme de sciences participatives. Il en existe déjà plusieurs dans le monde (ex : Globe at night, Cities at night, application Dark Sky Meter). En France, il existe également le projet FRIPON⁵ - porté notamment par le MNHN, le CNRS et l'Observatoire de Paris - qui vise à démultiplier le recensement des météorites via un réseau d'une centaine de caméras couvrant le territoire français. Pour le moment le projet FRIPON n'effectue pas de mesures de pollution lumineuse mais son protocole pourrait théoriquement

⁴ N.B. : Selon la norme X90 013, l'ULOR ne concerne que le luminaire et ne prend pas en compte la partie réfléchiée de la lumière. Il existe néanmoins un débat sur ce mode de calcul.

⁵ <https://www.fripon.org/>

l'intégrer. Réfléchir à monter des partenariats avec ces programmes d'inventaires à grandes échelles pourrait donc être une piste très intéressante pour alimenter un indicateur de pression « pollution lumineuse ».

Des perspectives prometteuses existent également dans le développement de nouveaux matériels pour effectuer ces mesures de noirceur du ciel (SQM). Par exemple, le bureau d'études DarkSkyLab déploie actuellement un boîtier « Ninox » permettant d'effectuer des mesures de manière autonome, diminuant ainsi les besoins humains (Deverchère *et al.*, 2018). Ce type de matériel réalise des mesures en continu et offre aussi la possibilité de disposer d'un suivi fin de la variation de la pollution lumineuse au cours des nuits (en fonction de la Lune, des pratiques de gestion de l'éclairage, ...) (cf. Figure 6).

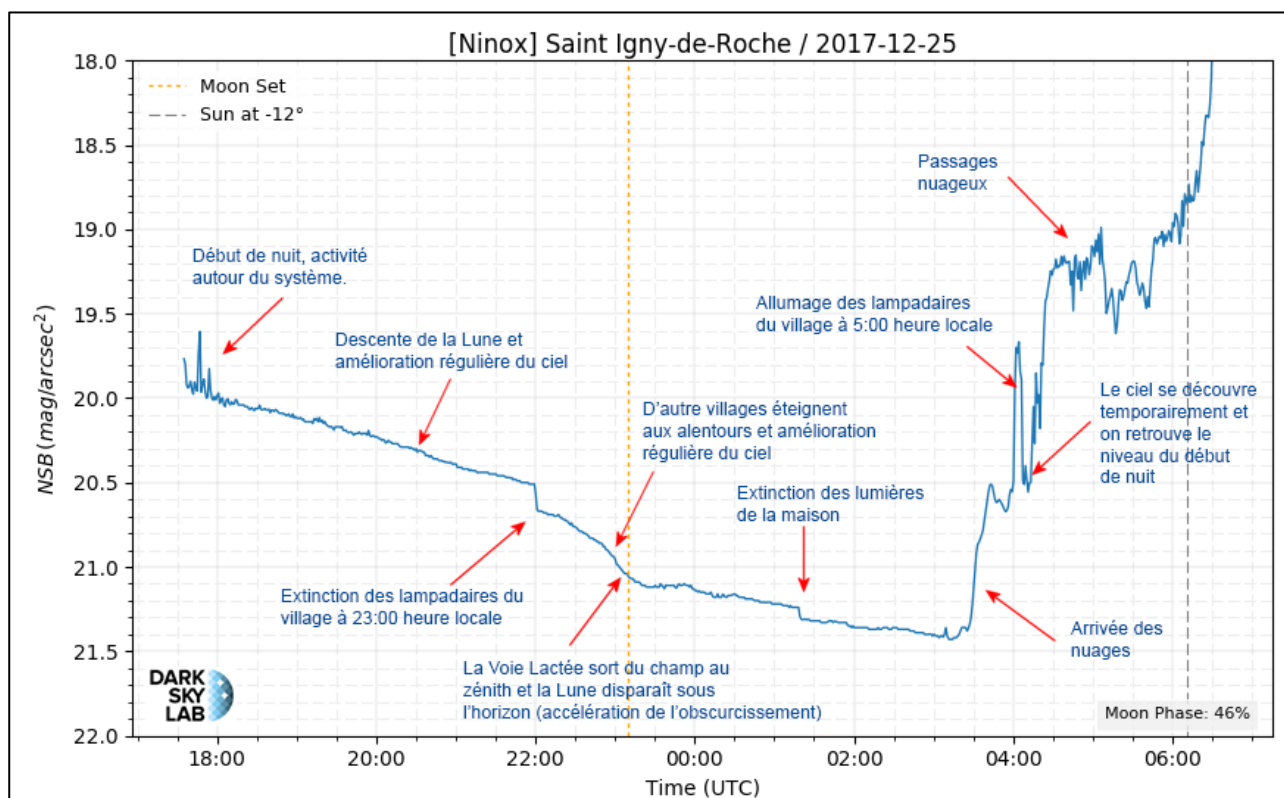


Figure 6 : Exemple de mesures effectuées en continu automatiquement au cours d'une nuit par le boîtier Ninox

Source : DarkSkyLab

Dans l'immédiat, en l'absence d'inventaires déjà déployé en France, il paraît plus faisable de travailler sur la lumière visible depuis le ciel en utilisant des **images aériennes** ou **même plutôt des images satellites**. Un indicateur serait donc à construire pour évaluer le nombre de points lumineux visibles par vue aérienne ou encore pour mesurer la quantité de lumière perçue par les satellites (radiance).

En ce qui concerne les prises de vue aériennes il existe quelques initiatives mais cela reste pour le moment marginal. On peut citer par exemple le projet « Flight », survol aérien nocturne au-dessus de la Région Parisienne (sur la base d'un partenariat entre le SIPPÉREC⁶ et l'IGN) ou celui financé par Nantes Métropole qui a permis la réalisation par l'IGN d'une carte nocturne de l'agglomération nantaise. Parallèlement à ce survol, des mesures au sol ont été menées par le Cerema dans ce projet. Une suite est en cours pour l'exploitation de cette cartographie et de ces données dans un objectif de détermination d'une « trame noire ».

Concernant les images satellites, il existe plusieurs satellites produisant des clichés nocturnes qui couvrent le territoire français. On peut citer notamment les satellites de la NASA : DMSP-OLS (en fonction de 1992 à 2013 avec une résolution de 5 km/pixel) ainsi que SuomiNPP et JPSS1 (en fonction depuis 2011, capteur VIRSS avec une résolution de 742 m/pixel). La résolution actuelle de ces images se révèle limitante pour des analyses

⁶ Syndicat Intercommunal de la Périphérie de Paris pour les Energies et les Réseaux de Communication

locales (identification des réseaux de connectivités) car certains des impacts interviennent à des échelles inférieures à 100 m (Azam *et al.*, 2018). Néanmoins, pour des analyses à large échelle (exemple à l'échelle nationale, Azam *et al.* 2016), ces résolutions sont suffisantes. Ces images présentent aussi l'intérêt d'être accessibles gratuitement. Par ailleurs, un archivage sur plus de 20 ans est disponible avec les satellites précités, ce qui est un atout important pour l'alimentation d'un indicateur. Cette source de données a été utilisée pour le dernier atlas mondial de pollution lumineuse, moyennant un ajustement des données par des mesures SQM issus du programme de sciences participatives mondial « Globe at night ». (Falchi *et al.*, 2016). En France, ces données satellites ont aussi servi à étudier l'impact de l'éclairage artificiel sur la répartition des chauves-souris (Azam *et al.*, 2016).

Une difficulté levée par les données satellites, au moins partiellement, est de ne pas se limiter à l'éclairage public car dans certaines zones l'éclairage privé est également très fort (industries, ZAC, centres commerciaux et leurs parkings, zones de loisir, restaurants et bars, parfois situés dans ou en bordure de milieu naturels, *etc.*). Ces données privées sont plus difficiles à mobiliser, y compris pour des mesures au sol (lieux pas toujours accessibles car privés). Sur ce point, le recours aux données satellites est donc un atout non négligeable puisqu'elles restituent la lumière captée par le haut qu'elle que soit son origine.

Sur le plan technique ces données satellites présentent néanmoins plusieurs limites dont il faudra tenir compte et informer dans le cadre d'un éventuel indicateur pour éviter toute mauvaise interprétation de ses valeurs. Notamment, les capteurs utilisés dans les satellites ne captent pas toujours l'ensemble du spectre (et notamment pas les longueurs d'onde bleues, ce qui pose question vue la conversion des éclairages extérieurs vers les LED dont la lumière est justement riche en bleu). Par ailleurs, on peut imaginer que la lumière visible depuis le ciel diminue dans les années à venir du fait d'une meilleure orientation des luminaires vers le bas car cette mesure est désormais bien passée dans les mœurs, ce qui est très positif. Dans le même temps, le rabattement des lampadaires vers le bas, à quantité de lumière constante, peut se traduire par davantage de pollution lumineuse pour les espèces évoluant en strate basse (eau, sol, ...). **Pour ces différentes raisons, un tel indicateur pourrait donc donner le signal d'une diminution de la pollution lumineuse alors qu'en réalité celle-ci n'a pas diminué (basculement vers des longueurs d'ondes non perçues par les satellites) et a pu même augmenter sous un certain angle (strate basse).** Toutefois, en l'état, le recours aux données satellites paraît la seule option envisageable actuellement pour un indicateur de pression à l'échelle nationale. Un couplage de ces données satellites avec des données locales (lampadaires, métrologie) pourrait être envisagé sur quelques zones de test, afin de calibrer la méthode et ainsi tenir compte des limites des données satellites présentées précédemment.

C. Composition de la lumière

Les impacts sur la biodiversité peuvent être liés à la quantité de lumière mais aussi à la composition de la lumière.

En effet, la lumière est une onde électromagnétique et comme toutes les ondes, elle peut alors vibrer à des fréquences différentes ou être caractérisée par des longueurs d'ondes différentes (cf. Figure 7). Chaque source lumineuse produit ainsi une lumière caractérisée par une proportion donnée des différentes longueurs d'onde. Ces proportions constituent le **spectre lumineux** que l'on décrit généralement sous la forme de diagrammes.

Or, dans le vivant, la lumière sert à voir (et/ou à être vu) mais elle agit également sur différentes « fonctions biologiques » telles que la photosynthèse, la régulation hormonale, le cycle circadien ou encore le phototactisme (cf. Figure 8). Chaque espèce ou groupe d'espèces présente alors sa propre sensibilité à la lumière en fonction des plages de longueurs d'onde (ex : Musters *et al.*, 2009 ; Perkin *et al.*, 2011). Toutes les plages de longueur d'onde du spectre du visible ou proche visible (IR, UV) se révèlent être impactantes pour au moins un groupe biologique (à noter que la notion d'impact dépend aussi du moment auquel la lumière (et donc telle ou telle longueur d'onde) est reçue par l'animal, ici nous nous intéressons aux espèces nocturnes). Pour cette raison, la littérature préconise comme principe de base de favoriser les éclairages artificiels émettant dans un spectre étroit (ex : Davies *et al.*, 2013) pour impacter le moins d'espèces possibles et le moins de fonctions biologiques.

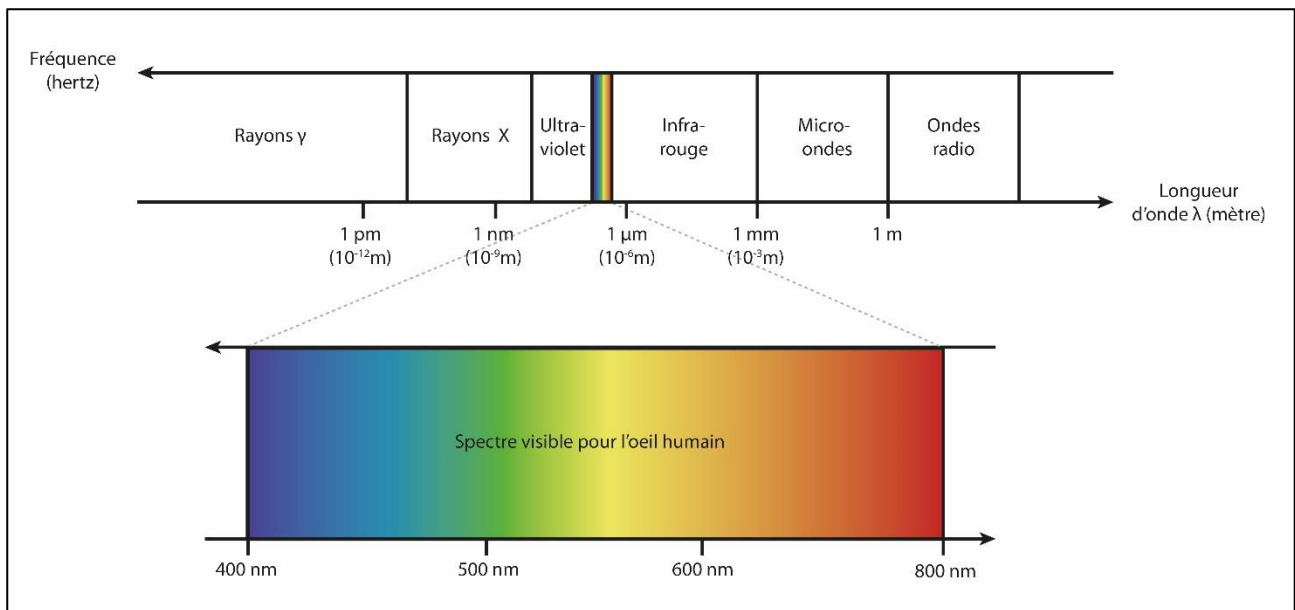


Figure 7 : La lumière, une onde électromagnétique pouvant vibrer avec plusieurs longueurs d'onde
Crédit : Sordello, 2017c

Par ailleurs, les plages du bleu, du vert et du rouge ressortent comme les longueurs d'onde les plus impactantes (Sordello, 2017c). Par exemple, le bleu est responsable du phototactisme chez plusieurs espèces et est également impliqué dans le système de régulation des horloges biologiques via le blocage de la production de mélatonine. Il est donc préconisé par la littérature de privilégier les lumières plutôt ambres/oranges pour les éclairages extérieurs (Pawson & Bader, 2014), longueurs d'onde qui ressortent comme les moins impactantes en l'état des connaissances.

| | Ultraviolet (<380nm) | Violet (380-450nm) | Bleu (450-500nm) | Vert (500-550nm) | Jaune (550-600nm) | Orange (600-650nm) | Rouge (650-750nm) | Infrarouge (>750nm) |
|---|---|---|--|--|--|--|--|---|
| Plantes | • Croissance | • Croissance | • Croissance | • Croissance | | | • Croissance • Horloge circadienne | • Croissance • Horloge circadienne • Horloge circannuelle • Rapports proies/prédateurs |
| Crustacés | | | | • Phototactisme | | | • Activité • Phototactisme | |
| Arachnides | | • Phototactisme | • Horloge circadienne • Phototactisme | • Phototactisme | • Horloge circadienne • Phototactisme | • Horloge circadienne • Phototactisme | • Horloge circadienne • Phototactisme | |
| Insectes | • Phototactisme • Orientation | | • Phototactisme • Orientation | • Phototactisme | • Phototactisme | | • Phototactisme | |
| Amphibiens | • Activité | • Horloge circadienne • Orientation • Phototactisme | • Horloge circadienne • Orientation • Phototactisme | • Horloge circadienne • Orientation • Phototactisme | • Orientation • Phototactisme | • Orientation • Phototactisme | • Phototactisme | |
| Oiseaux | • Régulation hormonale • Orientation | • Orientation | • Croissance • Horloge circannuelle • Phototactisme • Orientation | • Croissance • Horloge circannuelle • Phototactisme • Orientation | • Orientation | • Orientation | • Horloge circannuelle • Phototactisme • Orientation | • Croissance |
| Poissons | | | • Régulation hormonale • Croissance • Phototactisme | • Croissance • Phototactisme | • Phototactisme | | • Phototactisme | |
| Mammifères (hors chauves-souris) | • Horloge circadienne | • Horloge circadienne | • Régulation hormonale • Horloge circadienne | | • Horloge circadienne • Activité • Phototactisme | • Horloge circadienne • Activité • Phototactisme | • Horloge circadienne • Activité | • Horloge circadienne |
| Chiroptères | | • Horloge circadienne | • Horloge circadienne | • Horloge circadienne | • Horloge circadienne | • Activité | • Horloge circadienne | |
| Reptiles | | • Phototactisme | • Phototactisme | • Phototactisme | • Activité | | | |

Tableau 2 : Types d'impacts par plage de longueur d'onde pour chaque groupe biologique d'après Musters *et al.* 2009

Légende :

| | | | |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 type d'impact | 2 types d'impacts | 3 types d'impacts | 4 types d'impacts |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|

Figure 8 : Types d'impacts par plages de longueurs d'onde et par groupe biologique
Crédit : Sordello, 2017c d'après Musters *et al.*, 2009

Ce sujet des longueurs d'onde est fortement d'actualité. En effet, nous constatons à l'échelle mondiale une conversion massive des éclairages extérieurs depuis quelques années. Les lampes à décharge qui composent encore majoritairement les parcs d'éclairages publics - en particulier les lampes à vapeur de Sodium Haute Pression (SHV) qui produisent une lumière orangée - sont en train d'être remplacées par des lampes LED (Light Emitting Diode, Diodes Electro Luminescentes), qui sont des composants électroniques (on évalue entre 10 et 15 % le taux de pénétration des LED aujourd'hui en éclairage public). Ces dernières produisent une lumière blanche et présentent un fort pic de bleu du fait de la façon même dont elles sont fabriquées (cf. Figure 9). Cette évolution du orange vers le blanc riche en bleu dans les spectres lumineux des éclairages extérieurs pose de vraies questions sur les impacts que cela peut avoir sur la biodiversité au regard des connaissances exposées ci-dessus. En outre, la lumière bleue diffuse sur de plus grandes distances du fait de l'effet Rayleigh, augmentant le halo lumineux. Ainsi, si les LED offrent, à performance énergétique équivalente, des possibilités indéniables en termes de direction du flux, de gradation de l'éclairage ou encore de compatibilité avec les systèmes de détection de présence - que ne permettent pas les autres sources lumineuses - elles soulèvent des inquiétudes par rapport à leur spectre. Suivre cette évolution du parc d'éclairage extérieur par des indicateurs est donc un enjeu crucial pour la biodiversité.

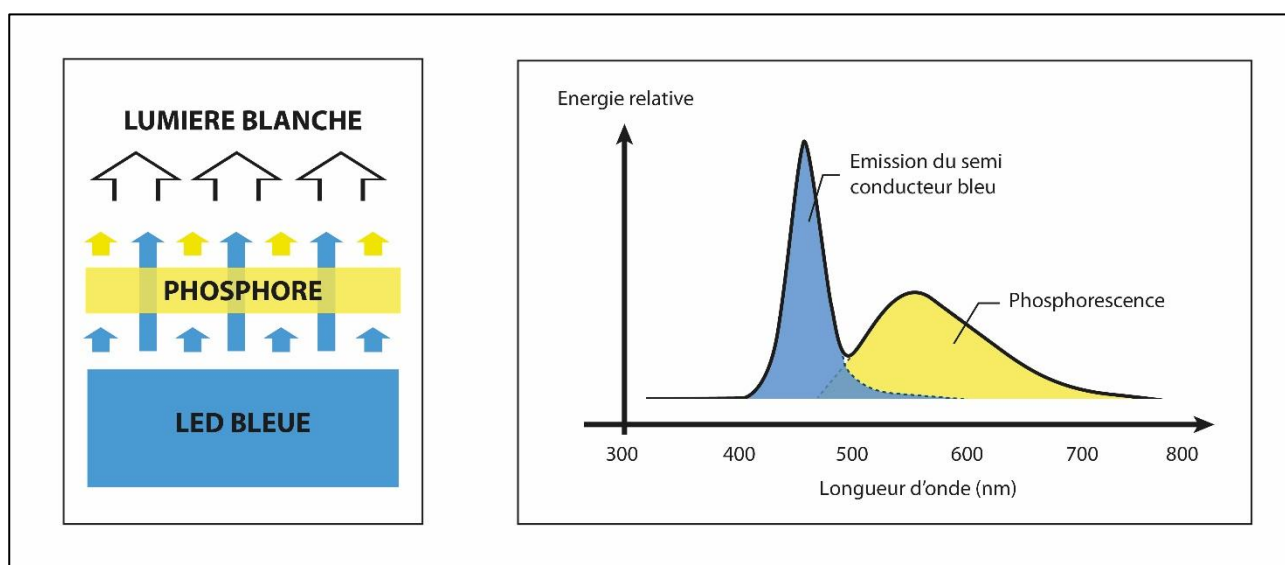


Figure 9 : Conception d'une lampe LED utilisée en éclairage extérieur (à gauche) et forme du spectre lumineux associé (à droite)

Crédit : Sordello, 2017c

Le spectre d'une source lumineuse est une donnée fournie par le constructeur. Celle-ci peut également être remesurée à partir d'un spectromètre. Néanmoins, pour un indicateur national la description des spectres paraît difficilement envisageable. Une autre piste pourrait être de passer par la **température de couleur**, qui est une variable globale décrivant la couleur de la lumière perçue. Elle est donnée en Kelvin (K). Plus la lumière comprend de bleus plus sa température est élevée (lumière froide), plus la lumière comprend de rouges plus sa température est basse (lumière chaude). Température de couleur et spectre lumineux ne sont pas totalement équivalents puisque différents spectres peuvent donner une même température de couleur. Le spectre donne donc une information plus précise sur la proportion de chaque plage de longueur d'onde. Néanmoins, construire un indicateur à partir des températures de couleur plutôt que les spectres lumineux peut être un premier élément de réponse. La température de couleur est une grandeur qui paraît plus accessible. En outre, les publications en écologie y font souvent référence. Par exemple, dans le cas de lampadaires à lumière blanche (LED par exemple), il est préconisé d'opter pour des blancs chauds, donc avec des températures de couleur basses, concrètement en-dessous de 3000 K (ex : Longcore *et al.*, 2015). Pour certaines espèces (vers luisants) cependant les effets semblent les mêmes que les LED soient chaudes ou froides (Lusti & Ineichen, 2016).

D. Temporalité de l'éclairage

La Recherche a pour le moment très peu étudié l'effet de l'éclairage nocturne sur la biodiversité en fonction de sa temporalité. Pourtant, la périodicité des espèces est quant à elle bien décrite et la littérature montre que les animaux ont pour la plupart un **rythme biologique marqué** : ils ne sont pas tous actifs aux mêmes heures de la nuit (par exemple certains sont plutôt crépusculaires et d'autres sont strictement nocturnes) ni sur la même durée (ex : Hailman, 1984 ; Yahel *et al.*, 2005 ; Contor & Griffith, 1995). De fait, on pressent donc que le moment auquel l'éclairage nocturne est allumé influence voire conditionne ses impacts, en fonction du profil temporel d'activité de chaque espèce. La durée de l'éclairage est sans doute aussi un facteur important.

Il serait donc intéressant de réfléchir à un indicateur portant sur la temporalité de l'éclairage. Cela pourrait être par exemple :

- les **horaires moyens d'allumage et d'extinction** de l'éclairage,
- la **durée moyenne d'éclairage** au cours d'une nuit.

De manière encore plus fine, cet indicateur devrait relativiser la temporalité de l'éclairage par rapport à la temporalité même de la nuit qui varie au cours des saisons plutôt que d'être implémenté en valeurs absolues.

Enfin, de nombreuses communes coupent leur éclairage public en cœur de nuit. Ce nombre pourrait constituer un indicateur intéressant. Néanmoins, les rares études ayant analysé l'effet de cette pratique sur la biodiversité (en l'occurrence les chauves-souris) suggèrent que, même si elle est théoriquement favorable, elle n'a pour autant concrètement qu'un très faible effet de réduction des impacts du fait que le début de nuit, période où l'éclairage est maintenu, est aussi la période privilégiée par les chauves-souris (Day *et al.* 2015 ; Azam *et al.* 2015). De plus, cet indicateur relèverait plutôt d'un indicateur de type « réponse » et il sera donc développé plus loin.

E. Récapitulatif sur les indicateurs de pression

1. Récapitulatif des formes de pollution lumineuse et des grandeurs d'éclairages associées

Le phénomène de pollution lumineuse pour la biodiversité est complexe. Il s'exprime sous différentes formes et concerne plusieurs dimensions de la lumière (quantité, composition, temporalité de l'éclairage, ...) (cf. Figure 10). D'autres aspects encore de cette complexité du phénomène existent, par exemple le sujet de la lumière polarisée⁷, que nous n'avons pas évoqué dans ce premier travail. La météo (en particulier la couverture nuageuse) a également une influence forte sur les niveaux de pollution lumineuse, agissant à la fois comme un facteur d'amplification (sur les distances courtes et moyennes) ou contraire de réduction (sur les longues distances).

Si la tâche s'annonce compliquée il paraît indispensable d'arriver à construire au moins **deux indicateurs** sur les aspects « quantité de lumière » pour couvrir *a minima* la pollution lumineuse au « sol » (éclairage) et la pollution lumineuse « aérienne » (halo). Ces deux mesures apportent en effet des informations très différentes. Comme expliqué précédemment, de nos jours, les luminaires sont de plus en plus dirigés vers le sol avec des flux lumineux moins diffusés (lampes encastrées dans le luminaire, utilisation de coupe-flux, LED à flux très dirigé, *etc.*), diminuant ainsi la lumière partant vers le ciel, à l'origine du halo lumineux. Pour autant, la lumière peut, dans le même temps, s'accroître au niveau du sol, augmentant ainsi cette autre forme de pollution lumineuse pour les espèces évoluant à proximité du sol, au sol ou dans l'eau. Quantifier et suivre les niveaux de lumière « vers le haut et « vers le bas » est donc important. **Néanmoins, pour le moment, la piste des données satellites est privilégiée car c'est la seule qui paraît réaliste en l'état des données disponibles à l'échelle nationale. En effet, à ce jour, il n'existe pas de base nationale de référencement des lampadaires ni de**

⁷ Certains animaux, par exemple les insectes, sont sensibles à la polarisation de la lumière. La lumière se polarise lorsqu'elle est réfléchie, au sol ou sur l'eau par exemple. L'implantation de lampadaires près des cours d'eau ajoute donc des impacts supplémentaires, ce qui est encore peu étudié mais sûrement largement sous-estimé.

programme de sciences participatives permettant de disposer dès maintenant de mesures de terrain sur toute la France.

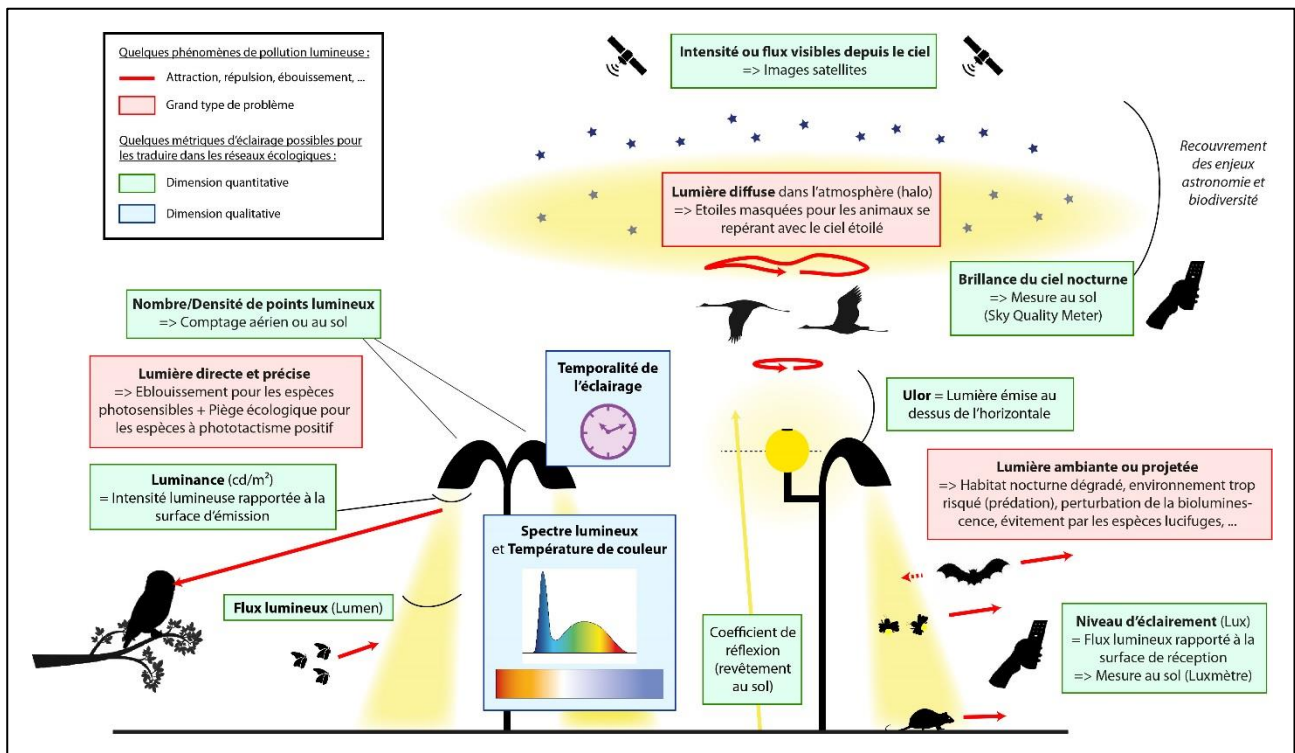


Figure 10 : Traduction des principaux aspects du phénomène de pollution lumineuse pour la biodiversité.
 Source : Sordello, 2017b

Comme expliqué, même si elles présentent plusieurs limites (restriction du spectre capté, lumière captée par le haut uniquement, captation à un temps t), les données satellites offrent de belles perspectives (disponibles gratuitement, résolution suffisante, couverture nationale, archives disponibles sur plusieurs années, ...). En outre, elles permettent de couvrir les éclairages publics comme privés puisqu'elles restituent l'ensemble de la lumière émise vers le haut quelle que soit son origine. Ces données satellites sont des « raster » intégrables sur SIG auxquelles il est donc possible de superposer facilement un maillage (ex : grille 2.5 km*2.5 km) pour en déduire un niveau de radiance par maille. Les données satellites pourraient être couplées à d'autres données pour consolider l'indicateur. Par exemple, des données de terrain disponibles pourraient servir à étalonner l'exploitation des données satellites afin de corriger l'écart entre la pollution lumineuse perçue au sol et celle perçue par le satellite.

2. Récapitulatif des sources de données « pression »

Ci-dessous, les différentes sources de données disponibles et leurs limites.

| Source de données | Commentaires |
|-----------------------|---|
| Métérologie (mesures) | Mesures in-situ de luminance, d'éclairement, de spectre, de brillance du ciel, etc. Complicé pour une échelle nationale (besoin d'un programme support type sciences participatives et/ou de matériels automatisés déployés à grande échelle) |
| Données lampadaires | Recensement fin et précis de la localisation des points lumineux et de leurs caractéristiques (orientation, puissance, hauteur, ...). Plusieurs communes disposent de ces données mais actuellement indisponible pour une échelle nationale. |

| | |
|--------------------------------|--|
| Modélisation | Démarche basée sur l'occupation du sol ou la densité d'habitants (=> « proxy » de la lumière artificielle). Intéressant dans une approche de communication et de sensibilisation mais insuffisant pour une démarche scientifique et opérationnelle. |
| Images aériennes ou satellites | Permet de déduire une quantité (et a priori aussi une qualité) de la lumière. Couvre à la fois l'éclairage public et privé. Lumière visible uniquement par le haut et captation qui ne couvre pas forcément l'ensemble du spectre. Prises de vues aériennes disponibles pour quelques communes seulement. Données satellites disponibles gratuitement, pour toute la France, avec une résolution suffisante pour un travail national et un archivage accessible depuis plus de 20 ans (satellites de la NASA). => la piste la plus pertinente actuellement, à approfondir. |

3. Récapitulatif des potentiels indicateurs de pression

Ci-dessous, un récapitulatif d'indicateurs de pression qu'ils seraient intéressants de développer et dont la faisabilité reste encore à approfondir.

| Indicateur envisagé | Unité | Données sources | Produit fini « idéal » |
|---|--|--|---|
| Niveaux d'éblouissements | Luminance (cd/m ²) | Métérologie => Complicé à grande échelle | Carte avec dégradé des niveaux de luminance ? |
| Nombre / Densité de points lumineux | Points lumineux et points lumineux/km ² | Recensements existants selon les communes => Pas de base de données nationale disponible | Nombre, Densité |
| Lumière perçue au sol (ambiante, projetée) | Eclairement (Lux) | Métérologie | Carte avec dégradé des niveaux d'éclairement ? |
| Lumière émise vers le haut (halo) | Radiance | Images aériennes, Images satellites | Carte nationale maillée |
| Température de couleur | K | Déduction éventuellement possible à partir d'images satellites ? | Carte de France avec un dégradé de température par maille ? |
| Horaires moyens d'allumage et d'extinction de l'éclairage | Heures | Indisponible a priori | Horaires |
| Durée moyenne d'éclairage par nuit | Heures | Données enquête ADEME 2012 ⁸ (3 200 h/an) ? | Durée |

⁸ Energie et patrimoine communal – enquête 2012 - ADEME

4. Formes de rendu des indicateurs

Pour chaque indicateur, en plus des valeurs moyennes nationales ou des cartes de France, il serait possible de calculer les proportions de communes en France ou les surfaces/nombre de mailles en France qui se retrouvent dans chaque classe. On peut également imaginer des rendus par grands types de milieux naturels et semi-naturels en utilisant des données d'occupation du sol (Corine Land Cover, Theia, ...) à l'image de ce qui a été fait à l'échelle mondiale (Bennie *et al.*, 2015). Il est aussi envisagé de présenter les résultats par rapport aux surfaces de trame verte et bleue en France. L'UMS Patrinat a en effet compilé avec le Cerema les données des Schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE, voir en partie IV) dans une base de données standardisée permettant des calculs nationaux (Billon *et al.*, 2015). Il serait ainsi possible de distinguer les niveaux de pollution lumineuse dans et en dehors des continuités écologiques.

III. Indicateurs d'état



La question à laquelle on souhaite répondre ici est : « *Quel est l'état de la biodiversité nocturne sensible à la lumière artificielle à l'échelle nationale (en France) et comment évolue-t-elle, de manière factuelle ?* »

A. Identifier des espèces cibles

Rappelons tout d'abord à nouveau que la majorité des animaux vivent en tout ou partie la nuit (28 % des vertébrés et 64 % des invertébrés selon Holker, 2010). Malgré tout, une difficulté réside dans la possibilité d'isoler l'effet de la lumière artificielle sur l'état de la biodiversité afin d'avoir un indicateur ciblé qui reflète précisément l'impact de cette pression et non pas d'autres aspects de l'artificialisation des milieux (bétonnage, bruit, ...) - à ce sujet se reporter à l'étude d'Azam *et al.* (2016). Il est donc nécessaire d'identifier des espèces pour lesquelles la pollution lumineuse est la menace principale ou au moins l'une des principales. A ce stade des connaissances scientifiques, trois groupes d'espèces pourraient être pertinents, d'une part, parmi les mammifères, les chiroptères, et d'autre part, parmi les insectes nocturnes, les hétérocères et certains coléoptères.

1. Les chiroptères

Les publications scientifiques mettant en évidence des conséquences néfastes de la lumière artificielle nocturne sur les chauves-souris sont désormais très nombreuses (ex : Azam *et al.*, 2016 ; Mathews *et al.*, 2015 ; Lacoeylle *et al.*, 2014 ; Stone *et al.*, 2012). De plus, des recherches menées par le Centre d'Ecologie et de Sciences de la Conservation (CESCO) ont montré que la lumière artificielle était le deuxième facteur expliquant le mieux la répartition de plusieurs espèces de chauves-souris, juste après l'agriculture intensive et avant l'imperméabilisation des sols (Azam *et al.*, 2016). Ce groupe paraît donc être un bon candidat à la construction d'un indicateur (Jones *et al.*, 2009).

Le CESCO serait en mesure, moyennant de disposer d'un financement, de construire et d'alimenter un indicateur sur les communautés de chauves-souris sensibles à la lumière artificielle.



Figure 11 : Petit rhinolophe (*Rhinolophus hipposideros*), espèce particulièrement sensible à la lumière artificielle nocturne

Crédit : V. Vignon

2. Les insectes nocturnes

Deux sous-groupes sont particulièrement intéressants : les hétérocères et les coléoptères Lampyridae.

De nombreux invertébrés utilisent les astres comme repères de navigation nocturne (Dacke *et al.*, 2013 ; Beaudouin, 1985 ; Wehner, 1984). Ils sont donc attirés par les éclairages artificiels. A l'échelle d'un paysage, des lampadaires d'une rue sont capables de modifier les communautés d'invertébrés (Davies *et al.*, 2012). Parmi ces insectes à phototactisme positif, le groupe le plus documenté est sûrement celui des **hétérocères (papillons de nuit)**.



Figure 12 : Les insectes nocturnes et en particulier les hétérocères subissent des effets démographiques importants et constituent donc un groupe biologique pertinent pour un indicateur d'état sur la biodiversité sensible à l'éclairage nocturne

Crédit : V. Vignon

Certains coléoptères (famille des *Lampyridae*) pratiquent la bioluminescence c'est-à-dire qu'ils produisent eux-mêmes de la lumière. En France ce groupe est représenté par les vers luisants (*Lampyris noctiluca*) et les lucioles (notamment *Luciola lusitanica*). Cette bioluminescence n'a pas réellement pour objectif d'éclairer le champ de vision mais principalement de constituer un moyen de communication nocturne, notamment entre mâles et femelles car la lumière est un signal bien visible par contraste dans le noir naturel de la nuit. Chez les lucioles, ce sont les mâles qui émettent de la lumière par leur abdomen et chez les vers luisants ce sont les femelles (qui sont aptères). Pour ces espèces bioluminescentes, la pollution lumineuse est donc un facteur de perturbation des échanges d'information et au final de réduction de leur habitat et de leur probabilité de reproduction. Les publications montrant les effets néfastes de l'éclairage sur les vers luisants se multiplient (ex : Bird & Parker, 2014 ; Ineichen & Ruttimann, 2012) et une autre met en évidence que la pollution lumineuse est un facteur de dégradation de l'habitat des lucioles (Picchi *et al.*, 2013). Les vers luisants (et probablement aussi les lucioles) pourraient être un bon indicateur dans la situation actuelle de conversion vers les LED. En effet la lumière qu'ils produisent est une lumière froide (longueurs d'onde bleu/vert) (Booth *et al.*, 2004). Par conséquent, leurs émissions rentrent explicitement en concurrence avec les longueurs d'onde

majoritaires dans la lumière LED. Une étude montre d'ailleurs que le fait de privilégier des LED chaudes aux LED froides n'améliore pas la situation pour les vers luisants (Lusti & Ineichen, 2016).

Avec ces trois taxons - chiroptères, hétérocères, coléoptères Lampyridae - les deux grands mécanismes que provoque la lumière sur le vivant c'est-à-dire l'attraction (ex : hétérocères) ou la répulsion (ex : chauves-souris, coléoptères Lampyridae) sont ainsi couverts.

3. Autres espèces potentielles

D'autres taxons semblent intéressants à considérer. Cependant, la production d'indicateurs sur ces groupes paraît envisageable seulement à plus long terme quand la littérature scientifique se sera consolidée.

En ce qui concerne les **rapaces nocturnes**, la connaissance scientifique ne paraît pas suffisante aujourd'hui pour utiliser ces espèces comme indicateur d'état. Compte tenu des caractères biologiques et morphologiques de ces oiseaux qui maximisent la vue en environnement obscur, il est vraisemblable que la lumière artificielle nocturne leur nuise, par exemple par effet d'éblouissement. Néanmoins la littérature ne l'a pas encore démontré *in-situ*. Certaines publications mettent par ailleurs en évidence qu'un peu de lumière nocturne les favoriserait dans leur comportement de chasse (Clarke, 1983 ; Dice, 1945). Le phénomène de pollution lumineuse est donc complexe pour ces espèces avec sans doute des effets de seuils que l'on connaît mal pour le moment.

Toujours concernant les **oiseaux, qu'ils soient diurnes ou nocturnes**, ceux-ci sont affectés par la pollution lumineuse dans leur **migration**. Néanmoins, là aussi il est difficile à l'heure actuelle d'établir un indicateur sur ce phénomène. En effet, les publications disponibles pour le moment décrivent essentiellement le comportement naturel des oiseaux vis-à-vis du ciel étoilé, ceux-ci se repérant grâce à la rotation du ciel nocturne (ex : Wiltschko *et al.*, 1987) et à la lecture de constellations (ex : Mouritsen & Larsen, 2001). Il est donc suggéré que le halo lumineux produit par les éclairages artificiels, qui masque le ciel étoilé, les perturbe. Néanmoins il n'y a pas de publications le démontrant *in-situ* pour le moment. Il existe en revanche des publications mettant bien en évidence l'effet de leurre des bâtiments éclairés la nuit pour les oiseaux en migration (phares, tours, ...) entraînant des mortalités massives (ex : Longcore *et al.*, 2013 ; Avery *et al.*, 1976) ou encore plus récemment l'influence de l'éclairage dans les haltes migratoires (McLaren *et al.*, 2018). En outre, les niveaux de lumière artificielle sont particulièrement forts à l'échelle de la planète sur les voies de migration des oiseaux (Cabrera-Cruz *et al.*, 2018). En conclusion, construire un indicateur d'état sur la pollution lumineuse et la migration de l'avifaune est un enjeu majeur mais la connaissance ne paraît pas mûre pour le faire actuellement.

D'autres groupes sont aussi affectés par la pollution lumineuse, notamment les **poissons** (ex : Riley *et al.*, 2012) et les **mammifères terrestres non volants** (Bliss-Ketchum *et al.*, 2016) ou encore le **plancton** (ex : Moore *et al.*, 2000) et les **coraux** (Aubrecht *et al.*, 2000). Une réflexion serait à mener éventuellement pour envisager un indicateur d'état aussi sur ces groupes. Notamment, il paraît important de disposer d'un indicateur sur des espèces aquatiques pour couvrir également ce milieu naturel d'intérêt majeur.

Enfin, localement, certains indicateurs pourraient aussi être construits pour des espèces à enjeux comme les **tortues marines** (ex : Thums *et al.*, 2016) ou les **oiseaux marins** comme les Puffins ou les Pétrels (ex : Wilhelm *et al.*, 2013 ; Rodriguez et Rodriguez, 2009). A noter qu'un LIFE Pétrels est en cours.

A terme, d'autres indicateurs pourraient être aussi étudiés sur le **dérèglement des rythmes biologiques** tels que les heures de sorties de gîtes de chiroptères, celles-ci étant perturbées par les éclairages (Downs *et al.*, 2003). La **flore** est à ce sujet un groupe à investiguer. La lumière, notamment le ratio jour/nuit, est en effet utilisé par les végétaux pour rythmer leur cycle de vie et déclencher les phases les plus importantes (tombée des feuilles, ouverture des bourgeons, ...) (ex : Bennie *et al.*, 2016 ; Basler & Korner, 2012). Ce calendrier est donc modifié par l'éclairage artificiel comme cela a été montré pour l'ouverture des bourgeons d'arbres en ville (Ffrench-Constant *et al.*, 2016). Suivre la phénologie des végétaux en ville est donc une piste intéressante à creuser également en lien avec l'effet des spectres variés.

B. Disponibilité en données

1. Besoins et contraintes

Si plusieurs groupes taxonomiques peuvent être à la base du développement d'indicateurs, la disponibilité en données sur ces espèces est un facteur très limitant pour concrétiser ces indicateurs. En effet, pour implémenter des indicateurs d'état de la biodiversité nocturne face aux pressions et réponses adoptées, il est nécessaire de disposer de données standardisées autorisant des comparaisons spatiales et temporelles.

En particulier, évaluer l'état de la biodiversité nocturne au regard de l'éclairage artificiel nocturne, ses réponses aux tendances d'évolution de l'éclairage artificiel (pressions) et aux politiques de limitation des impacts sous-entend d'être en mesure d'effectuer des comparaisons spatiales et temporelles de son état le long de gradient d'éclairage (intensité, spectres...etc.) et implique de disposer de suivis standardisés autorisant ce type de comparaisons.

Dans l'idéal ces suivis doivent être réalisés à large échelle de manière à offrir la possibilité de comparaisons le long du gradient de lumière artificielle nocturne (gradient paysager d'intensité d'éclairage en lien avec l'utilisation de l'espace : zones urbanisées, zones rurales, zones naturelles, etc. ; gradient de paramètres lumineux...).

L'intérêt réside également dans la capacité à considérer les réponses de plusieurs espèces sensibles (mais aussi moins sensibles à la lumière) de manière à pouvoir généraliser les résultats obtenus (ce qui n'est pas forcément possible lorsqu'une seule espèce est suivie, dans la mesure où son absence ou sa faible abondance, et leurs tendances temporelles, peuvent être tout à fait liées à d'autres paramètres que l'éclairage). Considérer des espèces qui soient à la fois sensibles et moins sensibles à l'éclairage (approche communautés) permet par ailleurs une comparaison des tendances selon les sensibilités à la lumière et permet de considérer indirectement les effets de l'éclairage sur les interactions entre espèces (certaines peuvent être favorisées au dépens d'autres).

Dans la mesure du possible, il est préférable de comparer des données standardisées d'abondance (ou d'activité) plutôt que de données de présence/absence dans la mesure où ce type de données apporte des informations plus fines (sensibilité) sur les réponses des espèces (les disparitions d'espèces restent relativement rares par rapport aux déclinés forts d'effectifs qui peuvent être constatés).

Certains programmes de Sciences participatives sont développés en ce sens et permettraient ce type de comparaisons à l'échelle nationale.

2. Programmes de Sciences participatives mobilisables

> On peut citer en premier lieu le programme **Vigie-Chiro** de Vigie Nature du MNHN qui vise à recueillir des données sur les chauves-souris. Ce programme correspond particulièrement au type de dispositif recherché ici pour la création d'indicateurs car ses suivis sont standardisés, à large échelle et concernent des espèces communes. Lancé dès 2006 à l'échelle nationale (soit un recul de 12 ans) et renseigné chaque année le programme Vigie-Chiro permet de disposer d'un jeu de données standardisées sur la distribution d'abondance d'une dizaine d'espèces de chauves-souris plus ou moins sensibles à la lumière. Il fait déjà l'objet de productions d'indicateurs de tendances des chauves-souris pour l'ONB. Il autorise tout à fait des comparaisons spatiales de tendances temporelles des communautés et donc a priori en fonction de l'évolution de la pression « lumière » ou en fonction des réponses apportées au niveau politique/opérationnel de gestion de l'éclairage. Il se prêterait donc *a priori* plutôt bien à la production d'un indicateur national d'état et de réponse de la « biodiversité » à l'éclairage artificiel nocturne.

En savoir plus : <http://vigienature.mnhn.fr/page/vigie-chiro>

> Il existe également l'**Observatoire des vers luisants et des lucioles**. Ce programme est animé par le CNRS et le Groupe Associatif Estuaire. Il vise à améliorer l'état des connaissances relatives aux différentes espèces de vers luisants et des lucioles. Le public non spécialiste participe en renseignant la présence ou l'absence de ces insectes dans les jardins. Cet Observatoire a été initié en 2015 et 3502 communes ont été représentées dès

cette première saison (cf. Figure 13). Ce programme étant encore récent, il ne paraît pas mobilisable pour le moment pour l'implémentation d'un indicateur national. Il est néanmoins très prometteur et doit être encouragé.

En savoir plus : <http://www.asterella.eu/index.php?pays=FRANCE>

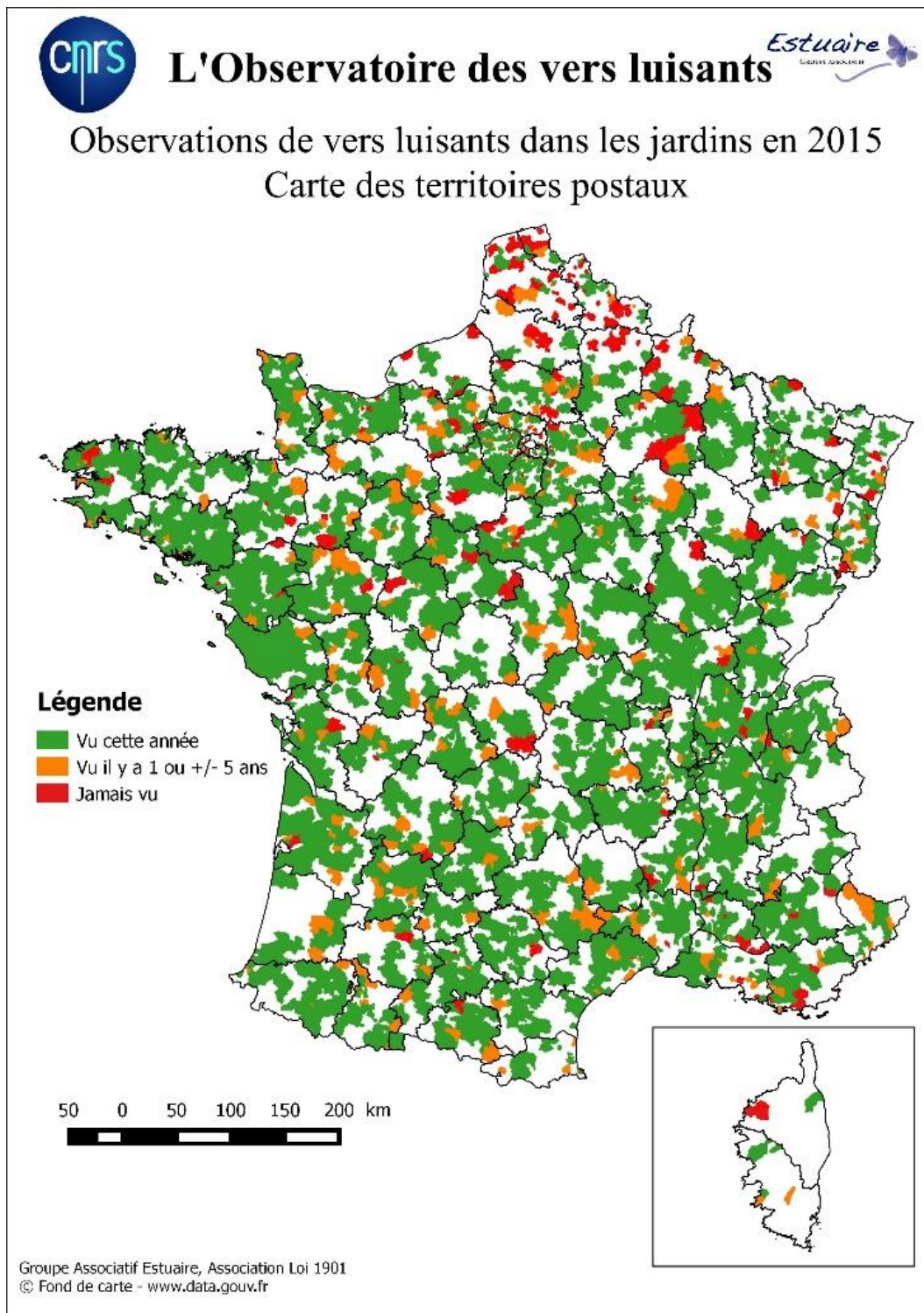


Figure 13 : Données d'observations de vers luisants en 2015

Crédit : CNRS/Groupe Associatif Estuaire

> Enfin, notons que si le programme **Insectes et ciel étoilé** - animé par Noé Conservation sous la coordination scientifique du MNHN et de l'Association Française d'Astronomie (AFA) (<http://vigienature.mnhn.fr/insectes-et-ciel-etoile>) - se présentait comme très prometteur pour répondre aux questions d'éclairage nocturne, il ne s'est pas - à ce stade - suffisamment concrétisé pour offrir cette possibilité de production d'indicateurs.

IV. Indicateurs de réponse



Les questions posées auxquelles on souhaite ici répondre sont : « *Quelle(s) réponses sont apportées par les acteurs politiques et opérationnels (éclairagistes, élus, gestionnaires d'espaces naturels, scientifiques, ...) aux problèmes que l'éclairage nocturne pose à la biodiversité ? Comment ces réponses évoluent-elles ? Ces réponses sont-elles pertinentes/efficaces précisément du point de vue des effets sur la biodiversité ?* »

Tout d'abord, il faut mettre en évidence que la limite est délicate entre indicateurs de pression et indicateurs de réponse. Par exemple, la mise en place d'extinctions de l'éclairage public en cœur de nuit sera ici considérée comme un indicateur de réponse mais dans le même temps les horaires et la durée d'éclairage par nuit - directement liés à l'application ou non de cette mesure - sont proposés comme un indicateur de pression. Il existe donc une relation étroite entre indicateurs de pression et de réponse qui peuvent indirectement amener à mesurer les mêmes choses. Les indicateurs de réponse doivent en revanche être abordés sous l'angle opérationnel.

En visant spécifiquement les actions en faveur de la biodiversité, nous pouvons identifier au moins deux types de réponses :

- les réponses de types « aménagement/planification »,
- les réponses de type « gestion de l'éclairage » pouvant intervenir sur les caractéristiques des points lumineux (spectres, quantité de lumière, direction, ...) ou leur temporalité (extinction en cœur de nuit, ...).

D'autres volets pourraient aussi être explorés, en lien avec l'animation de réseau et l'activité de la recherche, avec des propositions d'indicateurs tels que :

- le nombre de colloques/journées d'échanges portant sur pollution lumineuse et biodiversité en France chaque année,
- le nombre d'articles scientifiques portant sur « pollution lumineuse et biodiversité » produit chaque année.

A. Réponses de types « aménagement/planification »

1. La création d'aires protégées dédiées à la qualité de l'environnement nocturne

Des travaux scientifiques se sont intéressés aux liens entre les aires protégées pour la biodiversité et la pollution lumineuse. Gaston *et al.*, (2015) ont montré qu'entre 1992 et 1995, les aires protégées ont globalement perdu de l'obscurité et qu'en Europe tout particulièrement les aires protégées sont très exposées à la pollution lumineuse. Plus récemment, Guetté *et al.* (2018) ont montré qu'à l'échelle mondiale, sur les 20 dernières années, les aires protégées restaient des zones relativement préservées de la pollution lumineuse mais que celle-ci se concentre de plus en plus autour d'elles et tend ainsi à les isoler. Il est donc intéressant d'essayer de suivre ce phénomène particulièrement en France.

Pour le moment, il n'existe pas « officiellement » d'aire protégée dédiée à l'environnement nocturne c'est-à-dire qu'il n'y a pas de statut de ce type inscrit dans le Code de l'environnement ni même reconnu par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN). En revanche, il existe différents types de zonages proposés par le secteur de l'astronomie pour labelliser des espaces en raison de la qualité de leur ciel nocturne (Challéat, 2010 ; Challéat, 2016 ; Challéat, à paraître). Parmi les principaux labels de zonages existants⁹, il existe les « **Réserves internationales de ciel étoilé** » (RICE) proposées par la « International Dark Sky Association » (IDA) (Charlier & Bourgeois, 2013). Ce label international est en plein essor en France avec une RICE existante (Pic du Midi depuis 2013) et d'autres en cours de création ou de candidature (Parc national des Cévennes notamment).

Ces labellisations - dont le label RICE - sont décernées avant tout pour la qualité du ciel nocturne et donc pour des enjeux astronomiques (professionnels, amateurs, tourisme ; voir Lapostolle *et al.*, 2015 ; Bénos *et al.*, 2016 ; Challéat *et al.*, à paraître). Ils ne couvrent donc que partiellement les enjeux de biodiversité mais

⁹ En France il n'existe pas de label sous forme de zonages tel le label RICE. Il existe en revanche des labels à destination des communes, par exemple « Villes et Villages Etoilés » porté par l'Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturne. On peut également citer le label « Capitale Française pour la Biodiversité » - organisé par l'AFB, l'Agence Régionale pour la Biodiversité en Île-de-France et Plante & Cité - qui comprend une question sur les mesures engagées par la collectivité pour réduire la pollution lumineuse nocturne.

peuvent être intéressants pour cet aspect « halo lumineux ». Par ailleurs, la création d'une RICE est nécessairement bénéfique aussi à la biodiversité car elle crée une dynamique globale sur la préservation de l'environnement nocturne. Par exemple dans les Pyrénées, la RICE du Pic du Midi et le Parc national travaillent ensemble (Challéat *et al.*, à paraître). **Le nombre de RICE créées en France pourrait donc être proposé comme indicateur** (et ses éventuelles déclinaisons, telles que : nombre de communes en RICE, ...). Comme expliqué, pour le moment cet indicateur serait restreint à une seule RICE labellisée en France (Pic du Midi) mais il est susceptible d'augmenter assez fortement dans les années à venir, ce qu'il convient justement de suivre.

2. Le nombre de schémas prenant en compte la problématique de la pollution lumineuse pour la biodiversité

Parmi les schémas susceptibles de traiter de ce sujet, on peut lister aussi bien des schémas venant des politiques de la biodiversité (prenant alors en compte l'éclairage) que des schémas venant des politiques d'éclairage (prenant alors en compte la biodiversité) :

- les schémas régionaux de la trame verte et bleue,
- les chartes et plans de gestion des espaces naturels (parcs nationaux, réserves naturelles nationales et régionales, parcs naturels régionaux, espaces naturels sensibles, ...),
- les schémas de planification de la lumière.

La réflexion devrait aussi être étendue aux documents de planification de l'urbanisme (PLU(i), SCoT, règlement local de publicité) pour vérifier s'ils intègrent la problématique de la pollution lumineuse vis-à-vis de la biodiversité.

La notion de prise en compte de la pollution lumineuse ou de la biodiversité par ces différents schémas - qu'il s'agisse des documents d'urbanisme, des schémas de planification ou des schémas relatifs à la lumière, reste à définir selon un niveau plus ou moins fort (enjeux indiqués, cartographie ou non, actions concrètes, ...). Une réflexion est à mener sur ce sujet pour définir des grilles de lecture.

i. Les schémas régionaux de la trame verte et bleue

Depuis peu l'effet fragmentant de la lumière artificielle est mis en évidence par les scientifiques (Sordello, 2017a). Certaines zones se révèlent infranchissables pour certaines espèces parce qu'elles sont éclairées (Van Grunsven *et al.*, 2017 ; Bliss-Ketchum *et al.*, 2016). Le déploiement de réseaux écologiques prenant en compte cette pression devient alors une préconisation (Sordello *et al.*, 2014). La pollution lumineuse peut intervenir aux différentes phases d'une démarche de réseau écologique (Sordello, 2017b) : au moment du diagnostic, pour identifier des zones de conflit entre pollution lumineuse et continuités écologiques ou encore dans le plan d'action pour une gestion raisonnée de l'éclairage nocturne (cf. Figure 14).

Les Schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE) sont les schémas d'application de la politique Trame verte et bleue à l'échelle régionale. Après une première génération de SRCE adoptés ces schémas sont en train d'être remplacés par les SradDET (Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires). Le SradDET est un nouveau schéma intégrateur, mis en place par la loi NOTRe en 2016, visant à absorber différents schémas de planification régionale qui existaient jusqu'alors - dont le SRCE - dans un souci de simplification des normes. Les SradDET sont en cours d'élaboration par les Conseils régionaux et doivent être adoptés à l'horizon 2019.

Construire un indicateur sur le nombre de SRCE prenant en compte la pollution lumineuse est faisable (cf. Figure 15). Pour cela on pourra s'appuyer sur le bilan effectué par l'UMS Patrinat (Sordello, 2017d ; Sordello, 2015). En revanche, dans la mesure où il n'y aura pas de mise à jour des SRCE (du fait de leur remplacement par les SradDET), cet indicateur devient aujourd'hui moins pertinent, il ne pourra pas être actualisé en tant que tel.

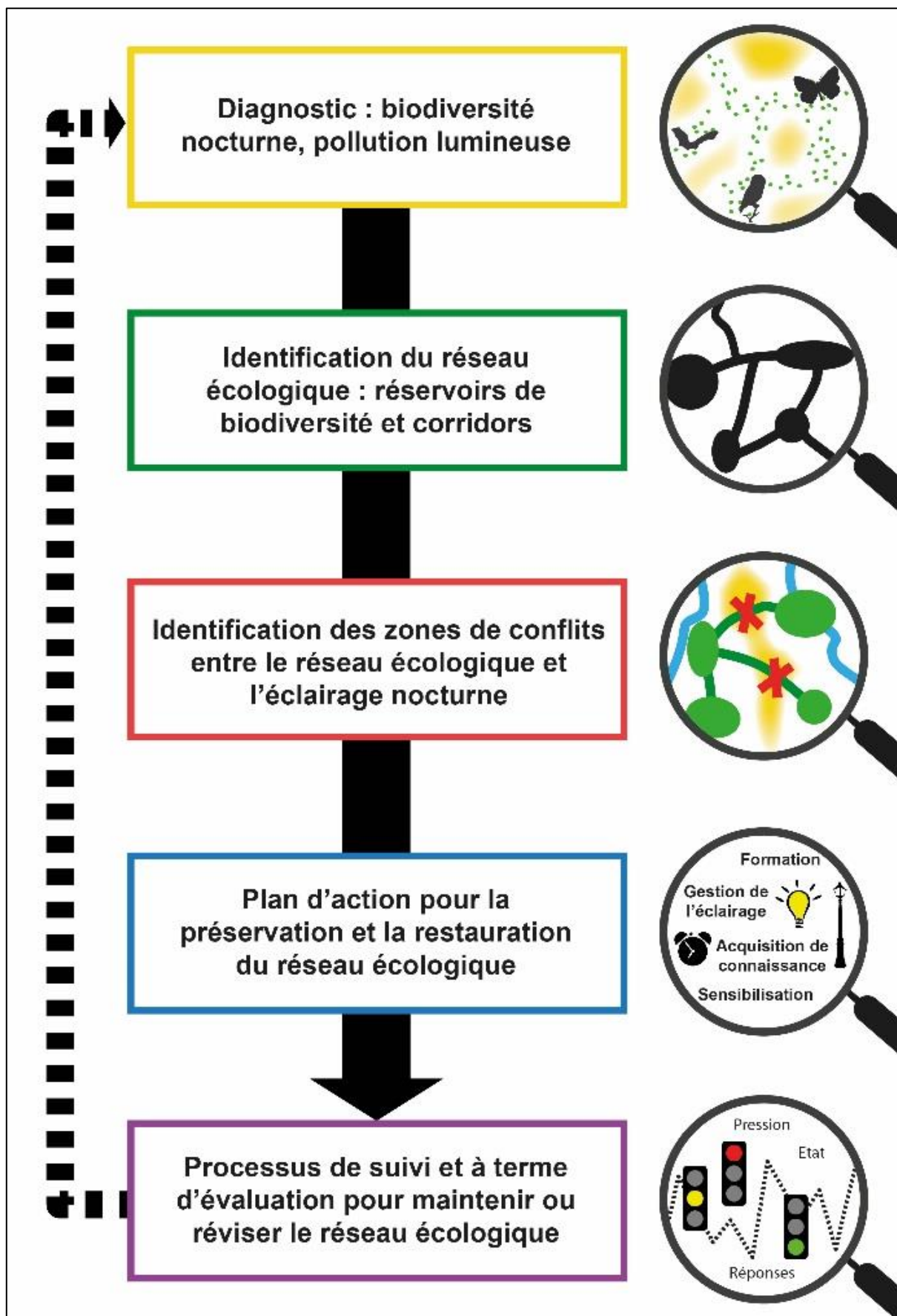


Figure 14 : Différentes possibilités de prendre en compte la pollution lumineuse dans une démarche de Trame verte et bleue

Crédit : Sordello, 2017b

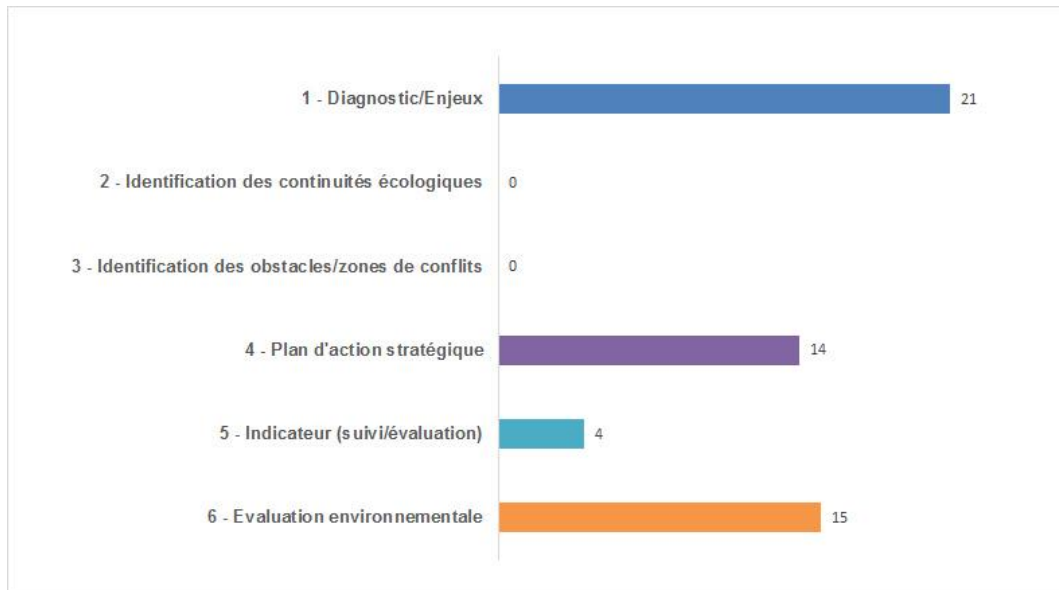


Figure 15 : Nombre de SRCE prenant en compte la pollution lumineuse pour chaque étape d'élaboration du SRCE

Crédit : Sordello, 2017d

Un indicateur basé sur les Sraddet paraît nécessaire pour prendre le relais des SRCE. En outre, ces schémas transversaux traiteront de deux problématiques touchant de près la pollution lumineuse : les consommations d'énergie et la biodiversité. La gestion de l'éclairage nocturne est donc précisément à l'interface entre ces deux enjeux. Un ou plusieurs indicateurs devraient être développés en ce sens.

ii. Les plans/schémas des espaces naturels

Comme expliqué précédemment, les aires protégées et les espaces naturels au sens large ont un rôle majeur à jouer dans le maintien et la restauration de l'obscurité. Ces espaces - tels que les parcs nationaux, les réserves naturelles ou les parcs naturels régionaux - reposent sur des chartes et/ou plans de gestion qui se fixent des objectifs pour plusieurs années. Désormais, de plus en plus de chartes et/ou plans de gestion identifient clairement un enjeu relatif à la préservation de l'environnement nocturne (lutte contre la pollution lumineuse, travail sur la trame noire, ...) (cf. exemple en Figure 16). Un indicateur pourrait ainsi porter sur le **nombre de parcs nationaux, réserves naturelles et parcs naturels régionaux ayant identifié la réduction de la pollution lumineuse comme un enjeu/objectif dans sa charte et/ou son plan de gestion.**

Cette réflexion devrait être étendue à d'autres espaces naturels tels que les sites Natura 2000 (documents d'objectifs), les terrains du conservatoire du littoral (compte tenu des enjeux très forts de pollution lumineuse sur la faune côtière) ou encore aux Espaces naturels sensibles et plus largement à tous les sites à vocation de biodiversité faisant l'objet d'un document de gestion ou d'un texte fondateur pouvant préconiser/réglementer une gestion de l'éclairage.

Là encore il convient de mener un travail pour définir une grille de lecture de ces chartes et documents afin d'identifier les éléments à rapporter et suivre dans le temps (enjeux décrits, trames identifiées, actions mises en œuvre, ...).

Objectif B.2.5**Participer à l'amélioration de la qualité du ciel nocturne**

(Objectifs I.2 et III.1 de la Stratégie de Séville)

Le ciel nocturne, déclaré « patrimoine de l'humanité » en 1992 par l'UNESCO, fait partie du patrimoine naturel à protéger sur le territoire du Parc.

Depuis une dizaine d'années, avec le développement mal maîtrisé, souvent inadapté, de l'éclairage extérieur, public ou privé, il est de plus en plus difficile de trouver des lieux où l'obscurité soit telle qu'elle permette une vision satisfaisante de la voûte céleste

Ce phénomène de sur éclairage ou d'éclairage mal dirigé entraîne une pollution lumineuse qui est également source de dérèglement des écosystèmes, avec un impact direct sur la faune et la flore, notamment dû au déficit d'alternance jour/ nuit dans les zones les plus éclairées.



Le Parc contribue à l'étude de l'impact de la pollution lumineuse sur l'écosystème et dresse un état des lieux, notamment cartographique, de cette dernière, avec des indicateurs de suivi permettant d'évaluer l'impact des actions menées dans le cadre des Plans Lumière Environnement.

Figure 16 : Objectif d'amélioration de la qualité du ciel nocturne dans la charte du PNR Luberon

iii. Les plans/schémas de planification de la lumière

Les communes et intercommunalités ont la possibilité d'élaborer des schémas de planification de l'éclairage nocturne. On distingue par exemple les Schémas Directeur d'Aménagement Lumière (SDAL), les Schémas de Cohérence d'Aménagement Lumière (SCAL) ou encore les Plans Lumière (PL). Ces schémas peuvent théoriquement comporter un volet sur la biodiversité. Il serait intéressant de suivre le nombre de schémas de ce type traitant de biodiversité. Cet indicateur permettrait de renseigner dans quelle mesure le secteur de l'éclairage s'empare lui-même du volet biodiversité.

La prise en compte de la pollution lumineuse dans les documents de planification des communes (Plans locaux d'urbanisme, Schémas de cohérence territoriale, ...) serait aussi un indicateur intéressant. Néanmoins, pour une échelle nationale la faisabilité d'un tel indicateur reste limitée. En effet, ces schémas sont réalisés sur la volonté des communes (territoire national non couvert en totalité) et ils ne semblent pas être centralisés par un acteur national à ce jour. Un premier travail serait donc de les recenser.

3. La réalisation de trames noires

Au-delà de prendre en compte la pollution lumineuse dans la trame verte et bleue, il est aussi possible d'identifier directement un réseau écologique caractérisé par son obscurité, pour la vie la nuit. On parle alors de trame noire ou de trame sombre. Quelques initiatives ont émergé ces dernières années, portées par des bureaux d'études, collectivités, espaces naturels (Sordello, 2017d) (cf. Figure 17). On peut citer par exemple la trame noire identifiée dans les Pyrénées (Parc national et PNR des Pyrénées ariégeoises, par DarkSkyLab) et celle identifiée à Lille par le bureau d'études Biotopie (Sordello *et al.*, 2018). D'autres projets sont en cours (Limoges agglomération, SCOT des Vosges centrales, PNR de la Montagne de Reims) et d'autres sont prévus. Il y a donc une montée en puissance de ces projets de trame noire en France. Le nombre de projets de trames noires pourrait ainsi constituer un indicateur intéressant pour suivre le déploiement de cette nouvelle forme de trame.

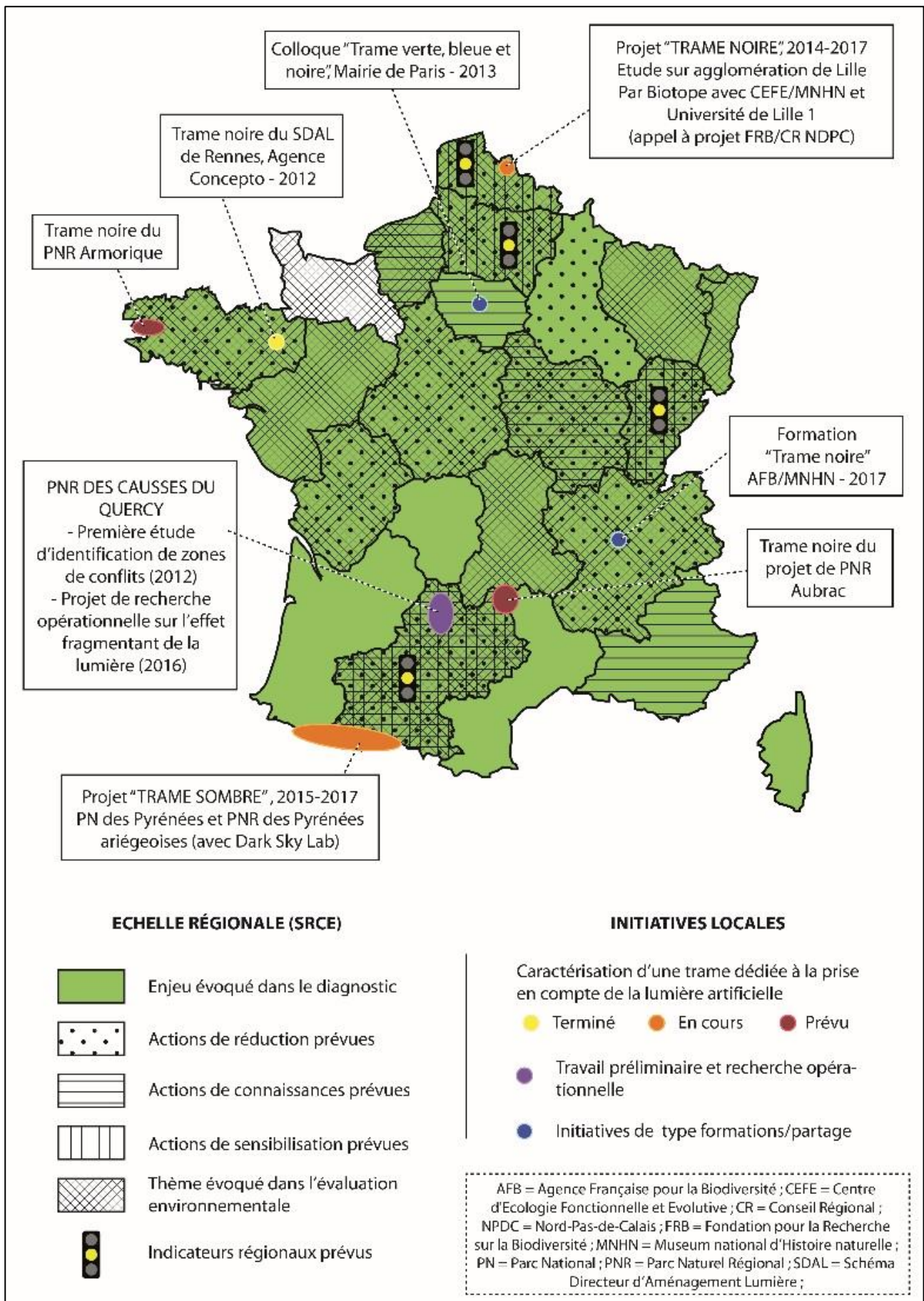


Figure 17 : Etat des lieux des principales initiatives de trame noire en France
Crédit : Sordello, 2017d

B. Réponses de types gestion de l'éclairage

Il existe une palette de mesures applicables pour réduire les conséquences écologiques de la pollution lumineuse (Gaston *et al.*, 2012). Que l'on soit ou non au sein des continuités écologiques, la gestion de l'éclairage est un levier majeur pour réduire la pollution lumineuse de manière effective (Sordello, 2018). Il est notamment possible d'agir sur trois axes :

- sur la dimension spatiale de l'éclairage. Sur ce point, les propositions formulées jusqu'ici peuvent déjà couvrir ce volet (nombre/densité de points lumineux, identification de trames noires, ...),
- sur la dimension temporelle de l'éclairage,
- sur les caractéristiques des luminaires et en particulier le choix des sources lumineuses.

1. Dimension temporelle

En ce qui concerne la dimension temporelle, les indicateurs sur les horaires et la durée d'éclairage - abordés dans la partie indicateur de « pression » - répondraient aussi en partie à ce volet. En revanche, ils pourraient être complétés par un indicateur concernant le nombre de communes qui pratiquent la coupure d'éclairage en milieu de nuit.

De nombreuses communes éteignent leur éclairage public en cœur de nuit. Cette coupure peut être totale ou partielle (sur tout le territoire ou seulement sur une partie, tous les jours de l'année ou seulement certains jours, ...). Ses horaires peuvent aussi varier selon les communes.

Un recensement des communes pratiquant l'extinction est effectué et rendu public sur le site NuitFrance (<http://www.nuitfrance.fr/?page=extinctions>). A partir de témoignages (d'élus, de citoyens, ...) ou sur la base de supports internet (articles de presse, ...) environ deux mille communes sont pour le moment recensées (recensement en continu, non exhaustif à ce stade). Les caractéristiques de ces extinctions (notamment les horaires) sont également renseignées le cas échéant. Les communes sont consultables sous forme de liste, d'une carte nationale géolocalisée (google map) ou également sous la forme de rendu croisé (par parc national, par parc naturel régional). Ce recensement pourrait être mis à disposition pour la construction d'un indicateur de réponse.

Vis-à-vis de la biodiversité, l'efficacité de cette mesure a fait l'objet seulement de deux études qui concernent les chauves-souris. Ces études ont conclu que le bénéfice de l'extinction dépendait fortement de l'horaire de celle-ci (Azam *et al.*, 2015 ; Day *et al.*, 2015). En effet, de nombreuses chauves-souris présentent un pic d'activité en début et fin de nuit (activité dite bimodale). Si l'extinction survient après ce pic, son efficacité est donc limitée pour ces espèces. Pour cette raison, il est donc conseillé d'éteindre le plus tôt possible, ce qui peut entrer en contradiction avec les besoins d'éclairage de la population humaine à ces mêmes heures de début et fin de nuit. Cette mesure apparaît donc d'ores et déjà comme insuffisante pour supprimer les effets de l'éclairage artificiel sur ces espèces.

Si seules les chauves-souris ont été étudiées pour le moment concernant l'efficacité de cette mesure de gestion de l'éclairage public, on peut pressentir que les résultats seraient les mêmes pour d'autres taxons car ce profil d'activité bimodale est assez répandu chez les espèces « nocturnes » (rapaces nocturnes, insectes, mammifères terrestres, ...) (cf. Figure 18).

Néanmoins, ces considérations ne doivent pas remettre en cause l'application de cette mesure, d'autant plus si elle est acceptée par les citoyens. Cette mesure relève du bon sens si aucun besoin humain n'est identifié en cœur de nuit. Elle peut aussi très vraisemblablement apporter des bénéfices pour certains taxons, notamment la flore, qui n'ont pas fait l'objet d'étude d'efficacité de cette mesure pour le moment.

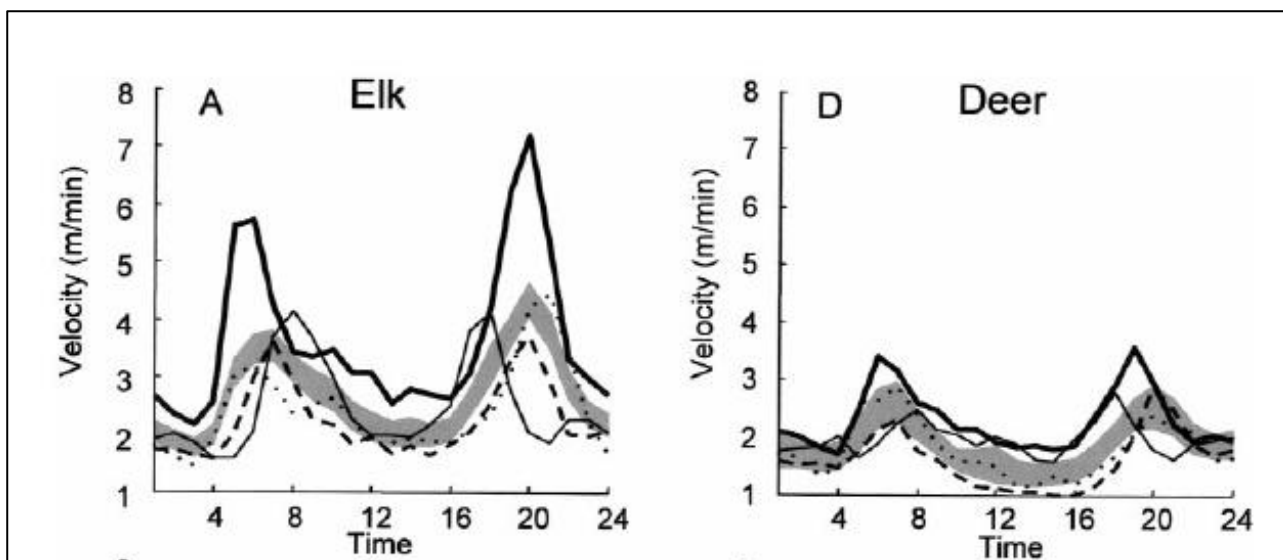


Figure 18 : Exemple de mise en évidence par suivi télémétrique d'une activité surtout concentrée au crépuscule et à l'aube chez des Cervidés

Source : Alger *et al.*, 2003

2. Sources lumineuses

Comme souligné à plusieurs reprises, le choix des sources lumineuses (impliquant notamment des différences dans les spectres lumineux) a une influence directe sur la pollution lumineuse. Le nombre de ventes ou d'installation (ou en proportion : la part dans le parc d'éclairage) des différents types de sources lumineuses (notamment les lampes Sodium Haute Pression et les lampes LED) pourraient ainsi être un bon indicateur rendant compte de l'évolution du parc d'éclairage public.

Quelques constructeurs vendent désormais des LED orange/ambres présentées comme « bat friendly ». C'est le cas par exemple de l'entreprise Innolumis qui propose des LED « Bat-Lamps »¹⁰ émettant une lumière orange avec un spectre étroit et une température de couleur autour de 1700 K. Ces lampes pourraient peut-être constituer un bon compromis entre :

- les aspects positifs des LED c'est-à-dire un éclairage moderne (facilement pilotable et économe en énergie). Même si le rendement est aujourd'hui moins bon que les LED blanches, on peut imaginer que ce point sera sans doute amélioré dans les années à venir par l'activité de recherche et développement,
- un éclairage peu perturbant pour la faune : lumière orange monochromatique (comme l'était le Sodium basse Pression).

Il serait intéressant de comptabiliser les projets installant ce type de LED, le nombre de points lumineux concernés et surtout d'évaluer l'efficacité réelle de ces LED ambres pour diminuer les effets sur la biodiversité par rapport aux autres LED et aux lampes à Sodium.

D'autres caractéristiques des points lumineux sont également à retenir ici (puissance, hauteur des mâts, orientation, ...)

C. Récapitulatif des indicateurs de réponse proposés

Ci-après, un récapitulatif d'indicateurs de réponse qu'il serait intéressant de développer et dont la faisabilité reste encore à approfondir.

¹⁰ http://docs.wixstatic.com/ugd/adba33_aa3328647361484bae81a5f4958ba2e8.pdf

| Indicateur envisagé | Données sources | Produit fini |
|--|--|---|
| Nombre de zonages labellisés (RICE) sur le territoire français | International Dark Sky Association | Nombre et carte de localisation |
| Nombre de SRCE/Sraddet prenant en compte la pollution lumineuse | Suivi MNHN/CDR TVB + Régions de France ? | Nombre et graphiques |
| Nombre de chartes de parcs nationaux, réserves naturelles, parcs naturels régionaux prenant en compte la pollution lumineuse. A étendre à tous les sites de biodiversité faisant l'objet d'un document de gestion ou d'un texte fondateur (N2000, ...) | FPNR, RNF, AFB, UMS Patrimoine, ... | A définir |
| Nombre de SDAL, de SCAL et de PL prenant en compte la biodiversité | Cerema ? | A définir |
| Nombre de documents d'urbanisme (PUL(i), SCoT, ...) prenant en compte la biodiversité nocturne | Cerema ? | A définir |
| Nombre de projets de trames noires mis en place | Suivi UMS Patrimoine/CDR TVB | Nombre et carte de localisation |
| Nombre de communes pratiquant l'extinction de l'éclairage public en cœur de nuit | NuitFrance ? | Nombre de communes, Horaires moyens d'extinction et d'allumage, Nombre de communes par types d'extinction (totale, partielle) |
| Nombre de luminaires vendus ou installés sur le parc public pour les différents types de sources lumineuses (LED, Sodium, ...) et selon leurs caractéristiques (Spectre, Puissance, ...) | ADEME ? Cerema ? AFE ? Un observatoire national de l'éclairage à mettre en place ? | Nombre ou pourcentages par type de sources lumineuses (SHP, LED, LED blanches/ambrières, par température de couleur, ...) |

V. Conclusions & perspectives

Ce rapport présente un **premier travail exploratoire** destiné à réfléchir à la construction d'indicateurs nationaux de pollution lumineuse selon les trois catégories pression / état / réponse. Il met en avant une complexité importante du sujet. Tous les indicateurs proposés ici n'ont pas vocation à être développés, il s'agit avant tout de pistes à approfondir. Ces différentes pistes ont été présentées au groupe de travail « indicateurs » de l'**Observatoire national de la biodiversité** en janvier 2018. La réflexion va se poursuivre en 2018 et au-delà. Ce rapport peut aussi servir de base à d'autres acteurs nationaux (CGEDD, ...), régionaux (Conseils régionaux, DREAL, ...) ou locaux (communes, espaces naturels, ...) s'intéressant aux indicateurs de pollution lumineuse.

Concernant les indicateurs de pression, il apparaît que la plupart des pistes évoquées sont difficilement concrétisables à une échelle nationale, par manque de données (recensement de points lumineux, métrologie, ...). Le cas échéant, ces éléments de réflexion pourront aussi alimenter des indicateurs plus locaux pour lesquels des relevés de terrain sont envisageables. Il apparaît néanmoins incontournable de pouvoir aboutir à au moins un indicateur national de pression. A ce stade, **la piste la plus pertinente est donc celle de l'exploitation des données satellitaires**. Même si ces données présentent des limites (lumière perçue par le haut uniquement, spectre parfois incomplet, ...), elles ont le mérite d'être disponibles gratuitement, dans une résolution suffisante pour une échelle nationale, de couvrir le parc d'éclairage public comme privé et avec des archives accessibles depuis plus de 20 ans (satellites NASA). Un travail exploratoire est donc à mener pour poursuivre la réflexion. Un travail bibliographique serait également pertinent pour approfondir dans la littérature scientifique les différentes manières de mesurer/cartographier la pollution lumineuse et mieux comprendre les travaux déjà menés à ce sujet (atlas mondiaux, ...).

En ce qui concerne les indicateurs d'état, la connaissance semble pouvoir permettre d'identifier quelques espèces ou groupes d'espèces cibles mais là encore la réflexion est à approfondir. En particulier, la piste la plus prometteuse est celle d'une production d'un indicateur basé sur le suivi national des chauves-souris communes (Vigie-Chiro, MNHN). Le CESCO serait a priori en mesure, suite à un travail dédié à cette question, de produire et d'implémenter régulièrement un **indicateur des communautés de chauves-souris sensibles à l'éclairage nocturne**.

S'agissant des indicateurs de réponse, certains peuvent a priori être renseignés très rapidement (ex : nombre de RICE en France) du fait des travaux déjà menés (ex : prise en compte de la pollution lumineuse dans les SRCE) ou au moins en partie (ex : nombre de projets de trames noires prévus/engagés/terminés). D'autres pourraient l'être moyennant un travail analytique dédié, par exemple pour identifier toutes les chartes/documents d'espaces naturels prenant en compte la pollution lumineuse ou les documents de planification de la lumière prenant en compte la biodiversité ou encore les documents d'urbanisme intégrant la pollution lumineuse. Certains de ces travaux sont *a priori* très conséquents et demanderaient d'abord de centraliser ces documents. Il conviendrait aussi d'établir des grilles de lecture pour mieux définir cette notion de « prise en

compte ». Concernant la gestion de l'éclairage, des pistes intéressantes sont identifiées et paraissent réalistes au regard des recensements existants (ex : recensement des communes pratiquant l'extinction en cœur de nuit). Enfin, au-delà d'identifier les réponses apportées et leur mise en œuvre, le travail à mener doit aussi permettre de mesurer l'efficacité de toutes ces réponses dans la réduction des effets des pressions sur la biodiversité.

Enfin, ce premier état des lieux montre également les **lacunes qui existent en termes de connaissances**, aussi bien sur les données de pressions que sur les données de biodiversité. Notamment, on ne peut que constater les manques de centralisation d'informations précises et utilisables concernant l'éclairage nocturne à l'échelle nationale (ex : recensement des points lumineux - au moins publics - et de leurs caractéristiques, horaires d'allumage/extinction, ...) ou encore le nombre limité de suivis standardisés à large échelle sur la biodiversité nocturne (insectes nocturnes, ...). Les préoccupations concernant l'environnement nocturne et la pollution lumineuse restent relativement récentes dans les sphères politiques et opérationnelles. Cela peut ainsi expliquer ce retard et ce manque d'organisation pour le moment pour recenser, centraliser, harmoniser ces données importantes. Dans tous les cas, à l'heure actuelle, ces manques compromettent fortement la construction d'indicateurs. Ce rapport a donc aussi vocation à souligner la nécessité d'**engager le plus rapidement possible des programmes nationaux**, de manière à consolider les possibilités de construction d'indicateurs à l'avenir. La fédération d'acteurs nationaux autour de cette question - par exemple sous la forme d'un observatoire de l'éclairage et/ou de l'environnement nocturne - serait également une initiative favorable pour faciliter la remontée de données locales et structurer la mise à disposition d'informations nationales validées et officielles.

VI. Références citées

- ALLDREDGE A.L. & KING J.M. (1980). Effects of moonlight on the vertical migration patterns of demersal zooplankton. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. Volume 44. Numéro 2. Pages 133–156. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(80\)90150-1](https://doi.org/10.1016/0022-0981(80)90150-1)
- AUBÉ M. (2015).— Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. Volume 370. Numéro 1667. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0117>
- AUBRECHT C., ELVIDGE C.D., LONGCORE T., RICH C., SAFRAN J., STRONG A.E., EAKIN C.M., BAUGH K., TUTTLE B.T., HOWARD A.T. & EERWIN E.H. (2008).— A global inventory of coral reef stressors based on satellite observed nighttime lights. *Geocarto International*. Volume 23. Numéro 6. Pages 467-479.
- AVERY M., SPRINGER P.F. & CASSEL J.F. (1976).— The Effects of a Tall Tower on Nocturnal Bird Migration: A Portable Ceilometer Study. *The Auk*. Volume 93. Numéro 2. Pages 281-291.
- AZAM C., KERBIRIOU C., VERNET A., JULIEN J.F., BAS Y., PLICHARD L., MARATRAT J. & LE VIOL I. (2015).— Is part-night lighting an effective measure to limit the impacts of artificial lighting on bats?. *Global change biology*. Volume 21. Numéro 8. <https://doi.org/10.1111/gcb.13036>
- AZAM C., LE VIOL I., BAS Y., ZISSIS G., VERNET A., JULIEN J.F., KERBIRIOU C. (2018).— Evidence for distance and illuminance thresholds in the effects of artificial lighting on bat activity. *Landscape and Urban Planning*. Volume 175. Pages 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.02.011>
- AZAM C., LE VIOL I., JULIEN J.F., BAS Y. & KERBIRIOU C. (2016).— Disentangling the relative effect of light pollution, impervious surfaces and intensive agriculture on bat activity with a national-scale monitoring program. *Landscape ecology*. Volume 31. Numéro 10. Pages 2471-2483. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0417-3>
- BASLER D. & KORNER C. (2012).— Photoperiod sensitivity of bud burst in 14 temperate forest tree species. *Agricultural and Forest Meteorology*. Volume 165. Pages 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.06.001>
- BEAUDOUIN 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 P. (1995).— Dispersal of Juvenile Cougars in Fragmented Habitat. *The Journal of Wildlife Management*. Volume 59. Numéro 2. Pages 228-237.
- BENNIE J., DAVIES W.T., CRUSE D. & GASTON K.J. (2016). Ecological effects of artificial light at night on wild plants. *Journal of Ecology*. Volume 104. Numéro 3. Pages 611-620. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12551>
- BENNIE J., DUFFY J.P., DAVIES T.W., CORREA-CANO M.E. & GASTON K.J. (2015).— Global Trends in Exposure to Light Pollution in Natural Terrestrial Ecosystems. *Remote Sensing*. Volume 7. Numéro 3. Pages 2715-2730. <https://doi.org/10.3390/rs70302715>
- BENOS R., CHALLÉAT S., LAPOSTOLLE D., DUPUY P.-O., POMÉON T., MILIAN J. & GIRARD F. (2016).— Protéger la nuit d'un haut lieu touristique de montagne. La Réserve Internationale de Ciel Étoilé du Pic du Midi de Bigorre comme nouvelle ressource territoriale. In : Delaplace M. & Gravari-Barbas M. (eds.), *Nouveaux territoires touristiques: invention, reconfigurations, repositionnements*. Pages 55-82. Presses de l'Université du Québec. ISBN : 978-2760546257.

BILLON L., CRIADO S., GUINARD E., LOMBARD A. & SORDELLO R. (2016).— *Elaboration d'une base de données nationale des composantes de la Trame Verte et Bleue à partir des données SIG des Schémas Régionaux de Cohérence Ecologique*. Service du patrimoine naturel, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris. 22 pages + annexes.

BIRD S. & PARKER J. (2014).— Low levels of light pollution may block the ability of male glow-worms (*Lampyrus noctiluca* L.) to locate females. *Journal of Insect Conservation*. Volume 18. Pages 737-743. <https://doi.org/10.1007/s10841-014-9664-2>

BLISS-KETCHUM L.L., DE RIVERA C.E., TURNER B.C. & WEISBAUM D.M. (2016).— The effect of artificial light on wildlife use of a passage structure. *Biological conservation*. Volume 199. Pages 25-28. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.04.025>

BOOTH D., STEWART A.J.A. & OSORIO D. (2004).— Colour vision in the glow-worm *Lampyrus noctiluca* (L.) (Coleoptera: Lampyridae): evidence for a green-blue chromatic mechanism. *Journal of Experimental Biology*. Volume 207. Pages 2373-2378. <https://doi.org/10.1242/jeb.01044>

CABRERA-CRUZ S.A., SMOLINSKY J.A. & BULER J.J. (2018).— Light pollution is greatest within migration passage areas for nocturnally-migrating birds around the world. *Scientific Reports*. Volume 8. Numéro 3261. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21577-6>

CHALLEAT S. (accepté, à paraître).— Le socio-écosystème environnement nocturne : un objet de recherche interdisciplinaire. *Natures Sciences Sociétés*.

CHALLEAT S. (2016).— La Noche, nuevo objeto de salvaguarda. In : Monod Becquelin A. & Galinier J. (eds.), *Las cosas de la noche*, 159-173. Open Edition Books, CEMCA CNRS. En ligne : <http://books.openedition.org/cemca/4242>

CHALLEAT S. (2010).— "Sauver la nuit". *Empreinte lumineuse, urbanisme et gouvernance des territoires*. Thèse de Doctorat de Géographie et Aménagement. Université de Bourgogne. 540 pages.

CHALLEAT S., LAPOSTOLLE D. & MILIAN J. (accepté, à paraître).— The nighttime environment in French mountain territories. Resource and operator of transition towards sustainability. *Journal of Alpine Research*.

CHARLIER B. & BOURGEOIS N. (2013).— Half the park is after dark. *L'Espace géographique*. Volume 42. Numéro 3. Pages 200-212.

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. <https://doi.org/10.1007/BF00299924>

CONTOR C.R. & GRIFFITH J.S. (1995).— Nocturnal emergence of juvenile rainbow trout from winter concealment relative to light intensity. *Hydrobiologia*. Volume 299. Numéro 3. Pages 179-183. <https://doi.org/10.1007/BF00767324>

COUVET D., JIGUET F., JULLIARD R. & LEVREL H. (2008).— Indicateurs et observatoires de biodiversité. *Biosystema*. Volume 25. Pages 83-90.

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. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.12.034>

DAVIES T.W., BENNIE J. & GASTON K.J. (2012).— Street lighting changes the composition of invertebrate communities. *Biology letters*. 4 pages. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2012.0216>

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. <https://doi.org/10.1111/gcb.12166>

DAY J., BAKER J., SCHOFIELD H., MATHEWS F. & GASTON K.J. (2015).— Part-night lighting: implications for bat conservation: Part-night lighting and bats. *Animal conservation*. Volume 18. Numéro 6. Pages 512–516. <https://doi.org/10.1111/acv.12200>

DEVERCHERE P., VAUCLAIR S., BONAVIDACOLA M. (2018).— *Mesure et modélisation de la pollution lumineuse*. 8 pages. <https://darksylab.com/publications/Mesure%20et%20mod%C3%A9lisation%20-%20DarkSkyLab%20-%20mars%202018.pdf>

DICE L.R. (1945).— Minimum intensities of illumination under which owls can find dead prey by sight. *The American Naturalist*. Volume 79. Numéro 784. Pages 385-416. <http://www.jstor.org/stable/2457707>

DOUJAK F.E. (1985).— Can a shore crab see a star?. *Journal of Experimental Biology*. Volume 116. Pages 385-393.

DOWNS N.C., BEATON V., GUEST J., POLANSKI J. & ROBINSON S.L. (2003).— The effects of illuminating the roost entrance on the emergence behaviour of *Pipistrellus pygmaeus*. *Biological conservation*. Numéro 111. Pages 247-252. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(02\)00298-7](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(02)00298-7)

EEA (1998).— *Guidelines for Data Collection and Processing*. EU State of the Environment Report, Annex 3.

FALCHI F., CINZANO P., DURISCOE D., KYBA C.C.M., ELVIDGE C.D., BAUGH K., PORTNOV B.A., RYBNIKOVA N.A. & FURGONI R. (2016).— The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*. Volume 2. Numéro 6, e1600377. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377>

FFRENCH-CONSTANT R.H., SOMERS-YEATES R., BENNIE J., ECONOMOU T., HODGSON D., SPADLING A., MCGREGOR P.K., (2016).— Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom. *Proceedings of the Royal Society*. Volume 283. Numéro 1833. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.0813>

GASTON K.J., DUFFY J.P., BENNIE J. (2015).— Quantifying the erosion of natural darkness in the global protected area system. *Conservation Biology*. Volume 29. Numéro 4. Pages 1132-1141. <https://doi.org/10.1111/cobi.12462>

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. <https://doi.org/10.1111/brv.12036>

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. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02212.x>

GERRISH G.A., MORIN J.G., RIVERS T.J., PATRAWALA Z. (2009).— Darkness as an ecological resource: the role of light in partitioning the nocturnal niche. *Oecologia*. Volume 160. Pages 525-536. <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1327-8>

GUETTE A., GODET L., JUIGNER M., ROBIN M. (2018).— Worldwide increase in Artificial Light At Night around protected areas and within biodiversity hotspots. *Biological Conservation*. Volume 223. Pages 97-103. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.04.018>

HAILMAN J.P. (1984).— Bimodal nocturnal activity of the western toad (*bufo boreas*) in relation to ambient illumination. *Copeia*. Volume 2. Pages 283-290. <https://doi.org/10.2307/1445183>

- HÖLKER F., WOLTER C., PERKIN E.K., TOCKNER K. (2010).— Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in ecology & evolution*. Volume 25. Numéro 12. Pages 681-682. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.09.007>
- INEICHEN S. & RUTTIMANN B. (2012).— Impact of artificial light on the distribution of the common European glow-worm, *Lampyris Noctiluca* (Coleoptera: Lampyridae). *Lampyrid*. Volume 2. Pages 31-36.
- JONES G., JACOBS D.S., KUNZ T.H., WILLIG M.R. & RACEY P.A. (2009).— Carpe noctem: the importance of bats as Bioindicators. *Endang Species Res*. Vol. 8: 93–115, 2009. <https://doi.org/10.3354/esr0018>
- JUSTICE M.J. & JUSTICE T.C. (2016).— Attraction of Insects to Incandescent, Compact Fluorescent, Halogen, and Led Lamps in a Light Trap: Implications for Light Pollution and Urban Ecologies. *Entomological News*. Volume 125. Numéro 5. Pages 315-326. <https://doi.org/10.3157/021.125.0502>
- KNOP E., ZOLLERA L., RYSERA R., GERPEA C., HORLERA M., FONTAINE C. (2017).— Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature*. Volume 548. Pages 206-209. <https://doi.org/10.1038/nature23288>
- KYBA C.C.M., KUESTER T., DE MIGUEL A.S., BAUGH K., JECHOW A., HOLKER F., BENNIE J., ELVIDGE C.D., GASTON K.J. & GUANTER L. (2017).— Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. *Science Advances*. Volume 3. Numéro 11, e1701528. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701528>
- LACOEUILHE A., MCHON 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. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103042>
- LAPOSTOLLE D., CHALLÉAT S., MILIAN J. & DUPUY P.-O. (2015) .— L’appropriation de la transition énergétique par la protection des ressources environnementales nocturnes : expériences dans les Pyrénées et les Alpes du sud. *Géocarrefour*. Volume 90. Numéro 4. Pages 351-360. <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.9967>
- LE CORRE M., OLLIVIER A., RIBES S. & JOUVENTIN P. (2002).— Light-induced mortality of petrels: a 4-year study from Reunion Island (Indian Ocean). *Biological conservation*. Numéro 105. Pages 93-102. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(01\)00207-5](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(01)00207-5)
- LEVREL H., KERBIRIOU C., COUVET D. & WEBER J. (2009).— OECD Pressure-State-Response indicators for managing biodiversity: A realistic perspective for a French biosphere reserve. *Biodiversity and Conservation, Springer Verlag*. Volume 18. Numéro 7. Pages 1719-1732. <https://doi.org/10.1007/s10531-008-9507-0>
- 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. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12206>
- LIN Y., LIU Y., SUN Y., ZHU X., LAI J. & HEYNDERICKX I. (2014).— Model predicting discomfort glare caused by LED road lights. *Optical Society of America*. Volume 22. Numéro 15. <https://doi.org/10.1364/OE.22.018056>
- LONGCORE T., ALDERN H.L., EGGERS J.F., FLORES S., FRANCO L., HIRSHFIELD-YAMANISHI E., PETRINEC L.N., YAN W.A. & BARROSO A.M. (2015).— Tuning the white light spectrum of light emitting diode lamps to reduce attraction of nocturnal arthropods. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. Volume 370. Numéro 1667. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0125>
- LONGCORE T. & RICH C. (2004).— Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*. Volume 2. Numéro 4. Pages 191-198. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0191:ELP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0191:ELP]2.0.CO;2)
- LONGCORE T., RICH C., MINEAU P., MACDONALD B., BERT D.G., SULLIVAN L.M., MUTRIE E., GAUTHREUX JR S.A., AVERY M.L., CRAWFORD R.L., MANVILLE II A.M., TRAVIS E.R. & DRAKE D. (2013).— Avian mortality at communication towers in the United States and Canada: which species, how many, and where?. *Biological conservation*. Volume 158. Pages 410-419. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.09.019>

- LUSTI C. & INEICHEN S. (2016).— *Impact of LED floodlight on the activity range of the common European glow-worm, Lampyrus noctiluca*. 2 pages.
- MATHEWS F., ROCHE N., AUGHNEY T., JONES N., DAY J., BAKER J. & LANGTON S. (2015).— Barriers and benefits: implications of artificial night-lighting for the distribution of common bats in Britain and Ireland. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. Volume 370. Numéro 1667. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0124>
- MAUCK B., GLASER N., SCHLOSSER W. & DEHNHARDT G. (2008).— Harbour seals (*Phoca vitulina*) can steer by the stars. *Animal Cognition*. Volume 11. Numéro 4. Pages 715-718. <https://doi.org/10.1007/s10071-008-0156-1>
- MCLAREN J.D., BULER J.J., SCHRECKENGOST T., SMOLINSKY J.A., BOONE M., EMIEL VAN LOON E., DAWSON D.K., WALTERS E.L., NORRIS R. (2018).— Artificial light at night confounds broad-scale habitat use by migrating birds. *Ecology Letters*. Volume 21. Pages 356-364. <https://doi.org/10.1111/ele.12902>
- MINNAAR C., BOYLES J.G., MINNAAR I.A., SOLE C.L., MCKECHNIE A.E. (2014).— Stacking the odds: light pollution may shift the balance in an ancient predator-prey arms race. *Journal of applied ecology*. Volume 52. Numéro 2. Pages 522-531. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12381>
- MOORE M.V., PIERCE S.M., WALSH H.M., KVALVIK S.K. & LIM J.D. (2000).— Urban light pollution alters the diel vertical migration of *Daphnia*. *Biology of freshwater Crustacea*. 4 pages.
- MOUGEOT F. & BRETAGNOLLE V. (2000).— Predation risk and moonlight avoidance in nocturnal seabirds. *Journal of Avian Biology*. Volume 31. Numéro 3. Pages 376–386. <https://doi.org/10.1034/j.1600-048X.2000.310314.x>
- MOURITSEN H. & LARSEN O.N. (2001).— Migrating songbirds tested in computer-controlled Emlen funnels use stellar cues for a time-independent compass. *Journal of Experimental Biology*. Volume 204. Pages 3855-3865.
- MUSTERS C.J.M., SNELDER D.J. & VOS P. (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 pp.
- PAWSON S.M. & BADER M.K.F. (2014).— LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature. *Animal behaviour*. Volume 24. Numéro 7. Pages 1561–1568. <https://doi.org/10.1890/14-0468.1>
- 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. <https://doi.org/10.1890/ES11-00241.1>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10841-013-9562-z>
- PLUMMER K.E., HALE J.D., O'CALLAGHAN M.J., SADLER J.P. & SIRIWARDENA G.M. (2016).— Investigating the impact of street lighting changes on garden moth communities. *Journal of Urban Ecology*. Volume 2. Numéro 1. Pages 1-10. <https://doi.org/10.1093/jue/juw004>
- PRUGH L.R. & GOLDEN C.D. (2014).— Does moonlight increase predation risk? Meta-analysis reveals divergent responses of nocturnal mammals to lunar cycles. *Journal of animal ecology*. Volume 83. Numéro 2. Pages 504-514. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12148>
- RICH C. & LONGCORE T. (2006).— *Ecological consequences of artificial night lighting*. Island Press. 458 pages.

- RILEY W.D., BENDALL B., IVES M.J., EDMONDS N.J. & MAXWELL D.L. (2012).— Street lighting disrupts the diel migratory pattern of wild Atlantic salmon, *Salmo salar* L., smolts leaving their natal stream. *Aquaculture*. Volumes 330-333. Pages 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.12.009>
- RODRIGUEZ A. & RODRIGUEZ B. (2009).— Attraction of petrels to artificial lights in the Canary Islands: effects of the moon phase and age class. *Ibis*. Volume 151. Pages 299-310. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2009.00925.x>
- SALDAÑA-VAZAQUEZ R.A. & MUNGUÍA-ROSAS M.A. (2013).— Lunar phobia in bats and its ecological correlates: A meta-analysis. *Mammalian Biology*. Volume 78. Numéro 3. Pages 216-219. <https://doi.org/10.1016/j.mambio.2012.08.004>
- SIBLET J.P. (2008).— *Impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité*. Synthèse bibliographique. Muséum national d'Histoire naturelle. 30 pages.
- SORDELLO R. (2018).— Comment gérer la lumière artificielle dans les continuités écologiques ?. *Revue Science Eaux, Territoires*. N° 25. Pages 66-69.
- SORDELLO R. (2017a).— Les conséquences de la lumière artificielle nocturne sur les déplacements de la faune et la fragmentation des habitats : une revue. *Bulletin de la Société des naturalistes luxembourgeois*. Volume 119. Pages 39-54.
- SORDELLO R. (2017b).— Pistes méthodologiques pour prendre en compte la pollution lumineuse dans les réseaux écologiques. *Vertigo*. Volume 17. Numéro 3. <https://doi.org/10.4000/vertigo.18730>
- SORDELLO R. (2017c).— *Pollution lumineuse : longueurs d'ondes impactantes pour la biodiversité. Exploitation de la synthèse bibliographique de Musters et al. (2009)*. Service du patrimoine naturel, Muséum national d'histoire naturelle, Paris. 18 pages.
- SORDELLO R. (2017d).— Pollution lumineuse et trame verte et bleue : vers une trame noire en France ?. *Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement*. Volume 35. <https://doi.org/10.4000/tem.4381>
- SORDELLO R. (2015).— *Première capitalisation méthodologique sur les Schémas régionaux de cohérence écologique adoptés ou en projet. Pollution lumineuse*. Service du patrimoine naturel, Muséum national d'histoire naturelle / Centre de ressources TVB. 15 pages.
- SORDELLO R., JUPILLE O., VAUCLAIR S., SALMON-LEGAGNEUR L., DEUTSCH E. & FAURE B. (2018).— Trame noire : un sujet qui « monte » dans les territoires. *Revue Science Eaux, Territoires*. Hors-série. 8 pages.
- 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.
- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02705.x>
- THUMS M., WHITING S.D., REISSER J., PENDOLEY K.L., PATTIARATCHI C.B., PROIETTI M., HETZEL Y., FISHER R. & MEEKAN M.G. (2016).— Artificial light on water attracts turtle hatchlings during their near shore transit. *Royal Society Open Science*. Volume 3. Numéro 160142. <https://doi.org/10.1098/rsos.160142>

TOUROULT, J., CHAUMET, S., PONCET, L. & SIBLET, J.-P. (coord.) 2017.— *Diagnostic et recommandations pour une stratégie d'acquisition de connaissances naturalistes continentales*. Tome I : Analyse des besoins et des dispositifs existants. Rapport MNHN-SPN/UMS-2006-PatriNat, n° 2017-10, 253 pages.

VAN GRUNSVEN R.H.A., CREEMERS R., JOOSTEN K., DONNERS M. & VEENENDAAL E.M. (2017).— Behaviour of migrating toads under artificial lights differs from other phases of their life cycle. *Amphibia-Reptilia*. Volume 38. Pages 49-55. <https://doi.org/10.1163/15685381-00003081>

WARRANT E. (2004).— Vision in the dimmest habitats on Earth. *Journal of Comparative Physiology A*. Volume 190. Numéro 10. Pages 765-789. <https://doi.org/10.1007/s00359-004-0546-z>

WEHNER R. (1984).— Astronavigation in Insects. *Annual Review of Entomology*. Volume 29. Pages 277-298. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.29.010184.001425>

WILHELM S.I., SCHAU J.J., SCHAU E., DOOLEY S.M., WISEMAN D.L. & HOGAN H.A. (2013).— Atlantic Puffins are Attracted to Coastal Communities in Eastern Newfoundland. *Northeastern Naturalist*. Volumes 20. Numéro 4. Pages 624-630. <https://doi.org/10.1656/045.020.0409>

WILTSCHKO W., DAUM P., FERGENBAUER-KIMMEL A. & WILTSCHKO R. (1987).— The Development of the Star Compass in Garden Warblers, *Sylvia borin*. *Ethology*. Volume 74. Numéro 4. Pages 285-292. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.1987.tb00939.x>

YAHAL R., YAHAL G., BERMAN T., JAFFE J.S. & GENIN A. (2005).— Diel pattern with abrupt crepuscular changes of zooplankton over a coral reef. *Limnology and Oceanography*. Volume 50. Numéro 3. Pages 930-944. <https://doi.org/10.4319/lo.2005.50.3.0930>



UMS 2006 PATRIMOINE NATUREL

Centre d'expertise et de données sur la nature

Muséum national d'Histoire naturelle
36 rue Geoffroy Saint-Hilaire
CP 41 - 75231 Paris Cedex 05

+33 (0)1 71 21 46 35
patrinat.mnhn.fr
inpn.mnhn.fr

L'éclairage artificiel nocturne a des effets néfastes dans de nombreux domaines et en particulier sur la biodiversité. Depuis le Grenelle de l'environnement la lutte contre ces effets sur la faune et la flore est inscrite dans le Code de l'environnement. La société dans son ensemble (acteurs opérationnels, collectivités, chercheurs, ...) s'est également emparée de cet enjeu.

Il existe donc un besoin de plus en plus pressant de disposer d'indicateurs nationaux sur ce sujet afin de suivre 1/ l'état actuel de cette pression appliquée à la biodiversité, 2/ l'évolution de la biodiversité en réponse à cette pression et 3/ l'application/efficacité des mesures mises en œuvre pour réduire cette perturbation de la biodiversité.

Dans ce contexte, l'UMS Patrinat, entourée d'un groupe d'experts scientifiques et techniques (Cerema, CESCO, CNRS/Collectif Renoir, DarkSkyLab, IRD, Irstea), a souhaité engager une réflexion préliminaire à la construction de tels indicateurs. Ce rapport présente les premiers éléments produits sous la forme d'un état des lieux des indicateurs pertinents à envisager et de la faisabilité de leur construction.

**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**

MINISTÈRE CHARGÉ DE L'ENVIRONNEMENT

www.afbiodiversite.fr



www.cnrs.fr



MUSÉUM
NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

www.mnhn.fr