

TRAME NOIRE

Méthodes d'élaboration et outils pour sa mise en œuvre

N°39

Romain SORDELLO, Fabien PAQUIER et Aurélien DALOZ

Cet ouvrage poursuit la collection
Comprendre pour agir qui accueille
des ouvrages issus de travaux de recherche et
d'expertise mis à la disposition des enseignants,
formateurs, étudiants, scientifiques, ingénieurs
et des gestionnaires concernés par la biodiversité.
Il est consultable sur le portail technique de
l'Office français de la biodiversité
(<https://professionnels.ofb.fr/fr/node/831>) ainsi
que sur le portail documentaire Eau & Biodiversité
(www.documentation.eauetbiodiversite.fr).



TRAME NOIRE



**Méthodes d'élaboration
et outils pour sa mise en œuvre**



● Romain SORDELLO, Fabien PAQUIER et Aurélien DALOZ



P

réface

Les pollutions de l'eau, de l'air et des sols sont généralement bien identifiées par tous comme des problèmes majeurs pour la biodiversité et pour notre santé. L'évaluation mondiale de la biodiversité et des services écosystémiques publiée par l'IPBES en 2019 en fait largement état. Il existe cependant un autre type de pollution souvent moins reconnu : la pollution lumineuse générée par nos éclairages la nuit. Pourtant, elle constitue un facteur important d'altération de notre environnement nocturne, causant de nombreuses perturbations à la faune et à la flore. D'autant que 30 % des vertébrés et 65 % des invertébrés sont en tout ou partie nocturnes.

Prenons un instant la place de ces espèces et imaginons que nous nous déplaçons la nuit dans un environnement chaque année plus éclairé par nos villes et nos infrastructures. Comment continuer à se déplacer en utilisant les étoiles comme le font les oiseaux alors que celles-ci sont désormais masquées par les halos lumineux de nos villes ? Comment éviter ces lumières attractives qui deviennent de véritables pièges mortels, notamment pour les insectes volants ?

À travers la politique Trame verte et bleue, les actions de préservation et de remise en bon état des continuités écologiques se sont fortement déployées ces dernières années en France. Mais la vie la nuit a trop longtemps été oubliée des politiques de biodiversité dans leur ensemble. La Trame noire propose ainsi de répondre à cet enjeu : préserver et restaurer des réservoirs de biodiversité et des corridors écologiques où l'obscurité est suffisante pour la biodiversité nocturne.

Le défi est de taille pour faire émerger un réseau écologique nocturne fonctionnel, alors que la pollution lumineuse continue de croître chaque année sur notre territoire et que l'obscurité régresse jusque dans les aires protégées. À l'interface avec la nécessaire croissance des économies d'énergie, avec une meilleure appropriation de l'environnement par les citoyens en lien avec leur santé, avec un engagement des élus dans la transition énergétique et avec le recours à l'innovation, la mise en place d'une Trame noire est une formidable opportunité pour décloisonner les disciplines, et *in fine* agir efficacement en faveur du vivant.

Le présent guide de la collection *Comprendre pour agir* de l'Office français de la biodiversité aspire ainsi à encourager le développement de la Trame noire en France, en proposant des définitions, des méthodes et des outils concrets. Il vise ainsi à initier de nouvelles réflexions au sein des territoires, afin qu'ils s'engagent en faveur de la nature. Il permettra d'inspirer tous les acteurs concernés et de démultiplier les projets visant la sobriété pour nos sociétés, mais aussi l'efficacité pour l'ensemble du vivant. Qu'il puisse donner l'envie d'agir concrètement pour le bien-être de tous.

Pierre Dubreuil

Directeur général de l'Office français de la biodiversité

Résumé et mots clés

Conséquence de l'artificialisation croissante de nos territoires, l'éclairage nocturne, public ou privé, engendre notamment une perte d'habitats naturels, une fragmentation accrue et une mortalité directe pour les espèces vivant la nuit. À l'instar de la Trame verte et bleue (TVB) qui a été envisagée essentiellement du point de vue des espèces diurnes, il est désormais nécessaire de préserver et de remettre en bon état les continuités écologiques nocturnes, dans un contexte de pollution lumineuse en constante progression.

Ce guide technique vise ainsi à mobiliser autour de ces enjeux, et à donner les clés pour agir. Il a vocation à apporter des éléments de connaissance ainsi que des éléments pratiques et opérationnels aux techniciens et élus de collectivités, syndicats d'énergie, Parcs naturels régionaux et nationaux, ainsi qu'à toute personne s'intéressant à la Trame verte et bleue et à l'impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité.

La première partie porte sur des éléments de définitions relatifs à la Trame noire et à ses interactions et complémentarités avec la Trame verte et bleue.

Dans la deuxième partie, différentes pistes méthodologiques sont proposées : identification des points de conflits avec la faune nocturne, identification de la Trame noire en lien avec la TVB, cartographie de la pollution lumineuse ou encore choix d'espèces modèles.

Enfin, la troisième partie aborde les outils réglementaires et techniques pour gérer l'éclairage artificiel au sein des continuités écologiques à travers les caractéristiques des points lumineux, leur organisation spatiale et la planification temporelle de l'éclairage.

Différents types d'encadrés émaillent le texte :

- Retour d'expérience
- Réglementation
- Aller plus loin

Opérationnel, cet ouvrage propose en complément un cahier des charges « type » pour la passation d'un marché relatif à la Trame noire à l'échelle d'une commune ou d'une intercommunalité, ainsi qu'un modèle d'arrêté relatif à la modulation de l'éclairage public en cœur de nuit. Un glossaire en fin de publication permet de retrouver facilement la définition de mots techniques utilisés.

Compte tenu du caractère récent du concept de Trame noire et de sa mise en œuvre, ce document est exploratoire et a vocation à être actualisé et enrichi dans les années à venir en fonction de l'avancement des connaissances et des futurs retours d'expériences.

Mots-clefs

Trame noire
Biodiversité nocturne
Pollution lumineuse
Économies d'énergie
Éclairage nocturne

Sommaire

- 2 Préface
- 3 Résumé et mots clés

Partie



- 7 ENJEUX ET CONCEPT

**Continuités écologiques et pollution lumineuse :
qu'est-ce que la Trame noire ?**

Partie



- 23 MÉTHODE

Comment identifier la Trame noire ?

Partie



- 61 OUTILS

Comment gérer l'éclairage artificiel dans les continuités écologiques ?

- 100 Annexes
- 102 Glossaire
- 104 Bibliographie et webographie
- 111 Auteurs, contributeurs et relecteurs

A

Enjeux et concept

Continuités écologiques
et pollution lumineuse :
qu'est-ce que la Trame noire ?



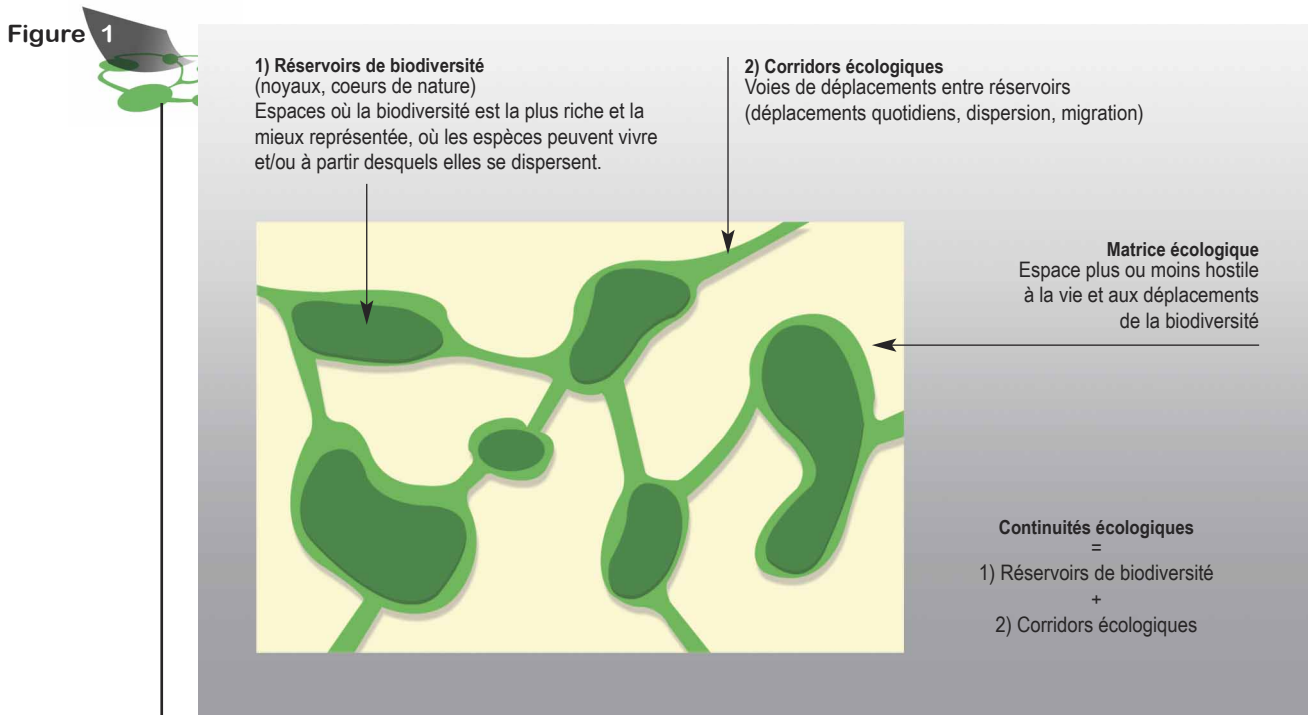
- 8 ■ 1 - Trame verte et bleue : prendre en compte la biodiversité dans l'aménagement du territoire
- 11 ■ 2 - Pollution lumineuse, un impact croissant sur la biodiversité
- 18 ■ 3 - Prise en compte de la pollution lumineuse dans la Trame verte et bleue
- 19 ■ 4 - Trame noire



1 – Trame verte et bleue : prendre en compte la biodiversité dans l’aménagement du territoire

La disparition des habitats naturels et leur **fragmentation***, notamment par l’urbanisation, l’agriculture intensive et le développement d’infrastructures, font partie des principales causes de l’érosion actuelle de la biodiversité. En particulier, la fragmentation des habitats entrave les déplacements de la faune, affecte le déroulement du cycle de vie des espèces et provoque une mortalité directe par collisions. À long terme, elle agit sur la structuration génétique des populations isolées, d’espèces faunistiques et floristiques. Pour réduire cette pression et aider la biodiversité à s’adapter spatialement face au changement climatique, le développement de réseaux écologiques est largement préconisé par la communauté scientifique.

En France, le ministère en charge de l’écologie ainsi que les collectivités territoriales portent une politique publique destinée à lutter contre la fragmentation des habitats naturels : la **Trame verte et bleue*** (TVB). Elle vise à mieux prendre en compte la biodiversité dans l’aménagement du territoire via les **continuités écologiques***. Ces dernières sont constituées de **réservoirs de biodiversité***, noyaux les plus riches, et de **corridors écologiques*** qui les relient (Figure 1).



Continuités écologiques, réservoirs de biodiversité et corridors. Source : d’après Sordello, 2017 [38].

* les termes en gras suivis d’un astérisque sont définis dans le glossaire en page 102.

La Trame verte et bleue est déclinée en sous-trames correspondant aux principaux types de milieux naturels. Le code de l'environnement en prévoit cinq (article R371-27) :

- milieux boisés ;
- milieux ouverts ;
- milieux humides ;
- cours d'eau ;
- milieux littoraux, pour les régions concernées.

Ces sous-trames sont toutes constituées de réservoirs de biodiversité reliés par des corridors, et leur superposition constitue la Trame verte et bleue dans son ensemble. Ce dispositif permet de tenir compte des besoins des espèces en termes de milieux de vie et de déplacement.

La Trame verte et bleue est mise en œuvre à trois échelles :

1- **l'échelle nationale**, par l'intermédiaire d'un document-cadre : les « Orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques » (ONTVB)¹. Elles définissent les grands objectifs de la politique TVB et comportent en particulier des enjeux écologiques destinés à assurer une cohérence nationale de la TVB ;

2- **l'échelle régionale**, avec initialement la mise en place de documents élaborés conjointement par l'État et la Région : les Schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE). Un nouveau schéma régional de planification, intégrateur de plusieurs schémas existants dont le SRCE, a été instauré par la loi Notre². L'élaboration de ce Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (Sraddet) est pilotée par le Conseil régional. Les Sraddet intégrant les SRCE, ces derniers n'ont plus d'existence propre dès l'entrée en vigueur des Sraddet. Quelques exceptions sont à noter : en Île-de-France le SRCE est maintenu ; dans les Régions et Départements d'outre-mer, le Schéma d'aménagement régional (SAR) a vocation à inclure un volet TVB ; en Corse, c'est le Plan d'aménagement et de développement durable de la Corse (PADDUC) qui comprend un volet relatif à la TVB ;

3- **l'échelle locale**, sur la base des projets des communes ou des intercommunalités, dont les documents d'urbanisme - Plans locaux d'urbanisme (PLU), PLU intercommunaux (PLUi) et Schémas de cohérence territoriale (Scot) - doivent intégrer les enjeux de continuités écologiques. Dans son article L101-2, le code de l'urbanisme précise que les collectivités publiques, dans leur action en matière d'urbanisme, doivent atteindre l'objectif de préservation et de remise en bon état des continuités écologiques.

Un rapport juridique d'opposabilité existe entre ces différents documents et schémas (Encadré 1) .

Rapport d'opposabilité entre les documents

Chaque échelon territorial est lié à l'échelon supérieur par un rapport juridique d'opposabilité :

- **de compatibilité**, qui implique une obligation de non contrariété aux orientations fondamentales de la norme supérieure, en laissant une certaine marge de manœuvre pour préciser et développer les orientations des documents supérieurs ;
- **ou de prise en compte**, qui implique une obligation de compatibilité un peu plus souple, avec dérogation possible pour des motifs justifiés.

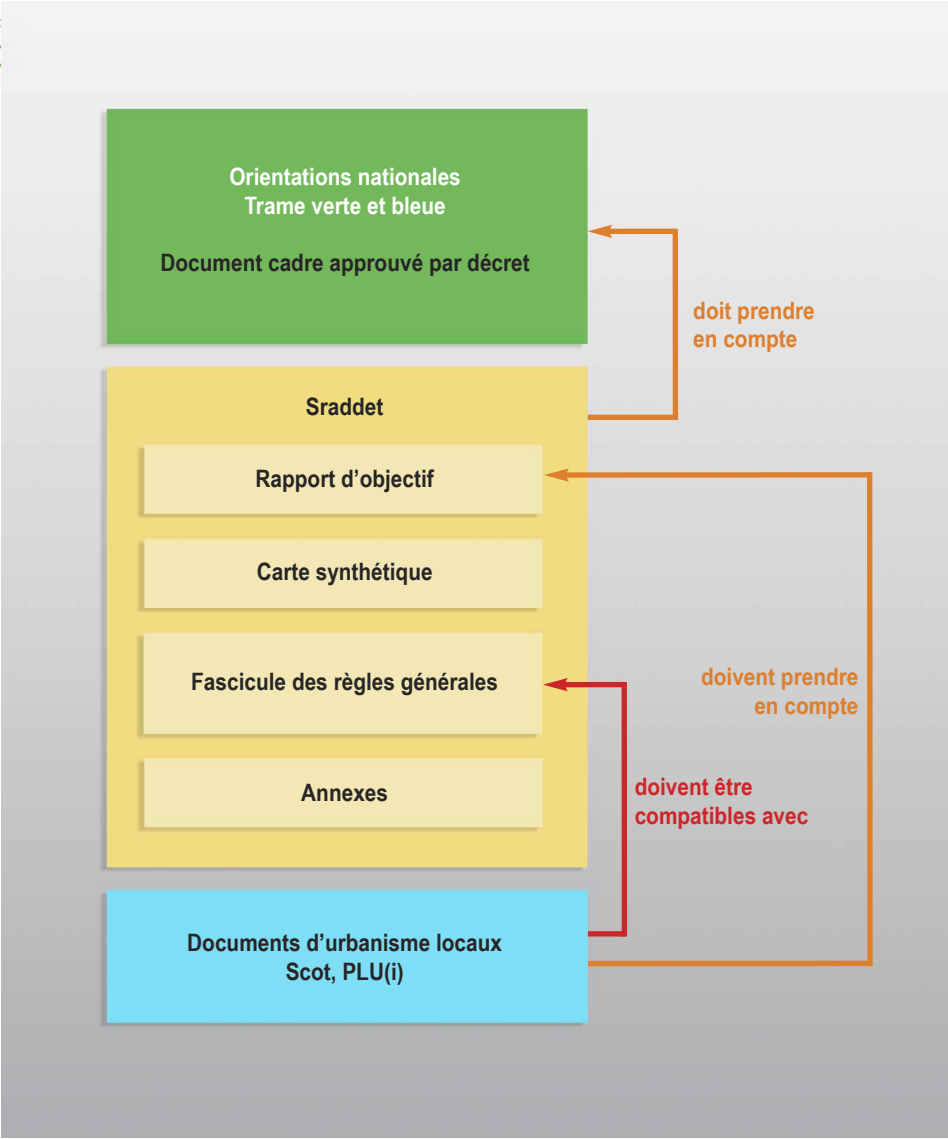
Ainsi, les Sraddet doivent **prendre en compte** les ONTVB. Les documents d'urbanisme doivent **prendre en compte** le rapport d'objectif du Sraddet et être **compatibles** avec son fascicule des règles générales (Figure 2).

En Île-de-France, les projets des collectivités et les documents d'urbanismes doivent prendre en compte le SRCE. Les documents de planification de l'État ainsi que ses projets d'aménagement et ceux de ses établissements doivent quant à eux être **compatibles** avec les ONTVB.

1 - Approuvées par le décret n° 2019-1400 du 17 décembre 2019

2 - Loi n° 2015-991 du 7 août 2015 portant nouvelle organisation territoriale de la République

Figure 2



Articulation entre les principaux documents intégrant la Trame verte et bleue.



2 - Pollution lumineuse, un impact croissant sur la biodiversité

Depuis son origine, la vie sur Terre est rythmée par une alternance de jour et de nuit qui a structuré l'évolution du vivant. Chez les animaux diurnes, ainsi que chez les végétaux, une phase d'obscurité - se traduisant par un « repos » - est essentielle dans le cycle journalier. Chez les animaux nocturnes, diverses adaptations permettent une activité dans un environnement très peu ou pas éclairé. Certaines espèces mobilisent d'autres sens que la vue (ouïe, odorat...) mais celle-ci reste très utilisée la nuit, grâce à des systèmes de vision adaptés à la pénombre. Parmi ces adaptations, on peut citer les gros yeux des chouettes et des hiboux ou encore les nombreuses cellules photoréceptrices des yeux des mammifères. Certains organismes (insectes par exemple) pratiquent également la bioluminescence, c'est-à-dire qu'ils produisent leur propre lumière, ce qui leur permet de voir et communiquer.

Le développement des sociétés humaines ces dernières décennies a impliqué une urbanisation massive. En France, d'après l'Observatoire national de la biodiversité, 65 758 ha d'espaces naturels et agricoles ont été artificialisés en moyenne chaque année entre 2006 et 2015³. Cette urbanisation s'est dans le même temps accompagnée d'une multiplication des éclairages artificiels nocturnes. Éclairer la nuit répond en effet à un besoin des sociétés modernes pour leurs activités nocturnes, l'Homme étant une espèce diurne d'un point de vue biologique. Or, ces éclairages génèrent une pollution lumineuse qui augmente elle aussi à un rythme important. À l'échelle de la planète, entre 2012 et 2016, la surface des zones éclairées a augmenté d'environ 2,2 % par an et la quantité de lumière émise d'environ 1,8 % par an [1]. Plus de 80 % de la population mondiale vit désormais dans des secteurs disposant d'éclairages nocturnes et cette proportion atteint 99 % en Europe [2]. Les analyses diachroniques publiées [3] montrent que la pollution lumineuse continue d'augmenter particulièrement en Europe, d'environ 6 % par an [4].



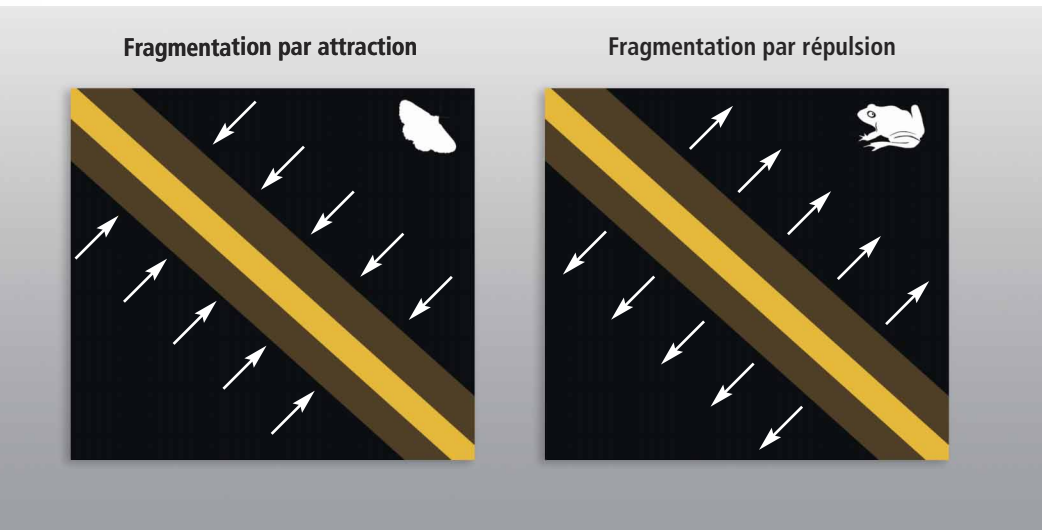
Évolution de l'éclairage artificiel dans l'ouest de l'Europe. À gauche : 1992 ; à droite : 2013. Source : Image and data processing by NOAA's National Geophysical Data Center. DMSP data collected by US Air Force Weather Agency. Acquisition & Production par La TeleScop

Les espaces naturels ne sont pas épargnés par cette pollution, y compris les aires protégées. Ces dernières subissent une régression de l'obscurité (d'environ 15 % en Europe de 1992 à 2010) [5] et une pression croissante de la lumière artificielle à leur périphérie. À l'échelle mondiale, **les hotspots de biodiversité*** sont fortement menacés par la pollution lumineuse [6].

Cette pollution lumineuse a des effets néfastes dans plusieurs domaines. L'éclairage extérieur pose problème pour l'astronomie et suscite des inquiétudes pour notre sommeil et notre santé. Il soulève aussi des questions par rapport aux consommations d'énergie et au budget des collectivités territoriales. Selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), l'éclairage public représente environ 42 % de la consommation d'électricité des collectivités territoriales et environ 20 % de leur facture énergétique⁴. La pollution lumineuse rejoint ainsi la problématique du changement climatique : la consommation des ressources qu'elle occasionne contribue aux émissions de gaz à effets de serre.

Enfin, la lumière artificielle nocturne a aussi de nombreux impacts sur la biodiversité (Figure 4 pages 14 et 15). Elle a des effets au niveau physiologique et métabolique, par exemple en perturbant la croissance, la métamorphose ou l'équilibre énergétique [7,8]. Au niveau comportemental, les points lumineux artificiels ont un pouvoir d'attraction ou de répulsion sur les animaux nocturnes qui est fonction de leur comportement naturel par rapport à la lumière (appelé **phototactisme***). Le phénomène d'attraction s'explique par l'usage du ciel étoilé par de nombreux animaux nocturnes (insectes, oiseaux...) [9]. Ceux-ci se retrouvent alors inévitablement désorientés, attirés par les éclairages artificiels qui constituent des pièges écologiques. Le phénomène d'évitement de la lumière (appelé comportement **lucifuge***), peut s'expliquer par un système de vision nocturne qui n'est pas adapté pour recevoir des quantités importantes de lumière et qui est donc susceptible de se retrouver rapidement saturé en présence d'éclairage artificiel [10]. Certaines espèces peuvent aussi associer la lumière à un risque accru de prédation [11]. L'éclairage artificiel constitue ainsi un facteur de dégradation voire de suppression de l'habitat de ces animaux (chauves-souris, mammifères terrestres, lucioles et vers luisants...) avec des effets jusqu'à l'échelle des populations et même des aires de répartition. Des travaux montrent que l'éclairage nocturne dégrade l'habitat des lucioles [12] et que les zones éclairées sont évitées par certains mammifères [13,14].

Figure 3



Effet de fragmentation d'une infrastructure éclairée par attraction ou répulsion de la faune. Source : d'après Sordello, 2017 [15].

Ce phénomène d'attraction/répulsion se répercute à l'échelle du paysage et l'éclairage artificiel peut alors former des zones infranchissables pour certains animaux, qui se retrouvent bloqués ou repoussés [15]. On constate en effet deux types de fragmentation par la lumière qui reflètent cette dichotomie connue au niveau comportemental (attraction/répulsion - Figure 3) :

- la fragmentation résultant de l'attraction empêche les animaux de traverser les infrastructures lumineuses puisqu'ils sont attirés puis piégés, tels les papillons de nuit qui, attirés par la lumière, tournent indéfiniment autour des lampadaires [16]. Ce phénomène a été décrit sous le terme de *vacuum effect* (effet aspirateur des milieux naturels adjacents) ;

■ la fragmentation résultant de la répulsion empêche les animaux de traverser les infrastructures lumineuses puisqu'ils s'en tiennent à distance par un mécanisme d'évitement de la lumière [17–19]. Une étude a par exemple montré qu'une route éclairée peut constituer une barrière infranchissable pour des crapauds en migration [20].

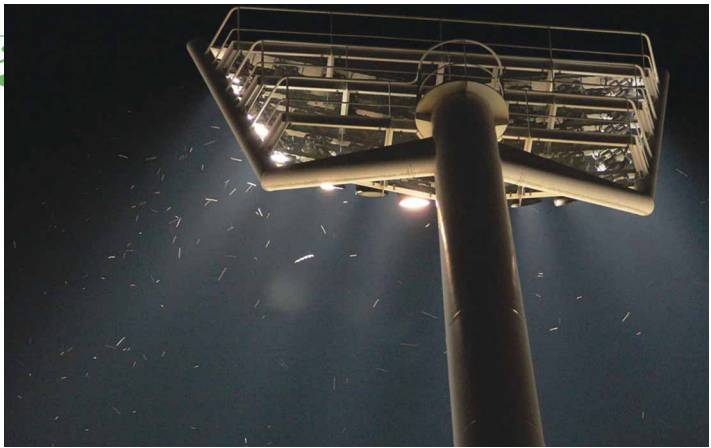
2



© Yohan Tison

Insectes morts, attirés par un panneau d'affichage lumineux - Ville de Lille.

3



© Vincent Vignon

Insectes attirés par le projecteur d'un stade.

4



© Romain Sordello

Chauve-souris volant dans la lumière d'un lampadaire où se concentrent des insectes.

La lumière artificielle la nuit occasionne donc une fragmentation et un mitage nocturne au même titre que certains éléments physiques du paysage (urbanisation, routes, barrages...) dont l'effet fragmentant est connu depuis longtemps.

Figure 4



Illustration de quelques effets de la pollution lumineuse sur la biodiversité.

1. Oiseaux

Pendant leur voyage, les oiseaux migrateurs se repèrent grâce au ciel étoilé. Déboussolés par les lumières des villes, ils peuvent tournoyer durant des heures autour de points lumineux et mourir d'épuisement ou de collision (tours éclairées, phares). Les oiseaux urbains diurnes ont leur rythme jour/nuit perturbé par les éclairages artificiels. Ne sachant plus faire la différence entre l'aube et la nuit, les mâles chantent jusqu'à l'épuisement toute la nuit.

2. Insectes volants

Les insectes volants s'orientent la nuit grâce au ciel étoilé ou à la lune. Ils sont ainsi irrémédiablement attirés par tous les éclairages artificiels où la plupart d'entre eux meurent d'épuisement ou brûlés par la chaleur des lampes.



3. Chauves-souris

Exclusivement nocturnes, les chauves-souris européennes, insectivores, sont extrêmement sensibles à la lumière. Ce sont des animaux qui fuient la lumière, certaines espèces cessent même leur activité en période de pleine lune. Cependant, localement, certaines chauves-souris tolèrent la lumière car celle-ci attire les insectes.

4. Serpents

Les serpents utilisent en partie une vision infrarouge leur permettant de décrypter le rayonnement thermique dans leur environnement. Selon les ampoules utilisées, les éclairages artificiels peuvent donc être susceptibles de brouiller cette perception. Les jeunes serpents quant à eux fuient la lumière pour éviter d'être repérés par leurs prédateurs.

5. Lucioles

Les lucioles émettent de la lumière par leur abdomen (de même que les vers luisants). Cette lumière sert surtout à la communication entre mâles et femelles. Leur communication étant brouillée par la pollution lumineuse, ces animaux désertent les espaces éclairés.

6. Plantes

Un excédent de lumière désynchronise fortement la saisonnalité des végétaux (apparition/disparition des fleurs et des feuilles) mais induit également un stress chez certaines espèces pouvant conduire à des maladies.

De plus, une partie des insectes qui pollinisent les plantes, et dont dépendent 90 % des plantes à fleurs, vivent la nuit et sont très impactés par la lumière artificielle. Les fleurs soumises à des éclairages sont moins visitées par les pollinisateurs nocturnes que dans une prairie dépourvue de lumière. Cette pollinisation réduite se répercute sur la production de fruits.

7. Araignées

Naturellement, une araignée tisse sa toile dans les zones obscures à l'abri des regards indiscrets. Un comportement qui tend à évoluer pour près de la moitié des espèces citadines. Ces dernières semblent tirer parti de la pollution lumineuse puisqu'elles installent désormais leur toile à proximité de sources de lumière pour avoir plus de chance de capturer de la nourriture.

8. Mammifères terrestres

Les cervidés (cerf, chevreuil...) ont des difficultés à franchir une route éclairée. Le rayon d'action de ces espèces animales est donc restreint par la lumière artificielle, limitant ainsi leur accès à la nourriture. Les éclairages affectent également le rythme de vie des mammifères (sommeil/temps d'activité).

9. Amphibiens

La lumière contraint les femelles d'amphibiens à s'accoupler avec le premier mâle venu pour éviter la prédation. Les mâles, d'ordinaire très vocaux et bien visibles, se font plus discrets. Conséquences : les accouplements se font plus rares chez certaines espèces.

10. Tortues marines

À leur naissance, les jeunes tortues s'orientent spontanément vers la lumière. Celle-ci les guide naturellement vers la mer, plus lumineuse que la terre grâce à la réverbération de l'eau et la blancheur de l'écume. Sur un littoral éclairé, ce contraste terre/mer est inversé, les petites tortues tout juste écloses sont désorientées et se dirigent vers l'intérieur des terres.

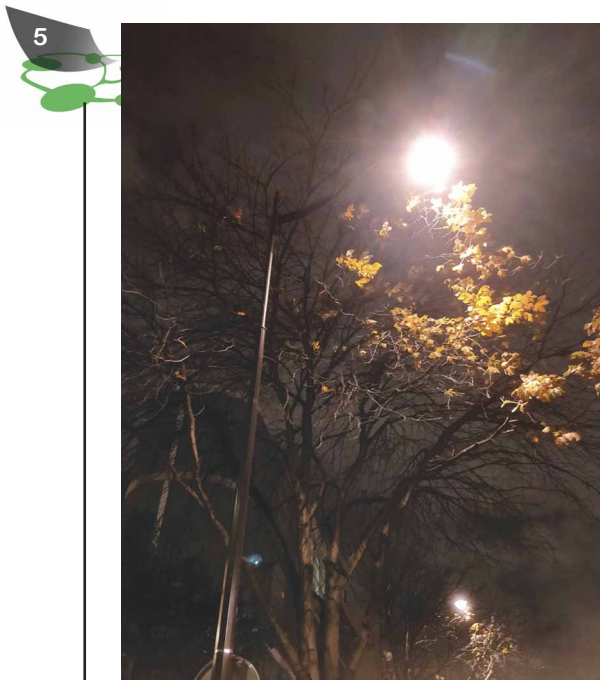
11. Poissons

Les poissons peuvent être très attirés par la lumière ce qui peut provoquer un épuisement ou une augmentation de la prédation. Les pêcheurs ont d'ailleurs certaines techniques qui utilisent la lumière pour attirer les poissons.

La pollution lumineuse agit également sur d'autres niveaux de la biodiversité tels que les relations entre espèces. Le phénomène d'attraction concentre certaines espèces proies, notamment les insectes, au niveau des zones éclairées. Cela permet une pression de prédation déséquilibrée de la part de certains prédateurs nocturnes capables de tolérer localement la lumière, telles que les araignées [21] ou les chauves-souris [22]. Ce piégeage des insectes sous les points lumineux entrave également la pollinisation. Une étude a par exemple montré que l'éclairage nocturne pouvait réduire la visite des fleurs par les insectes la nuit d'environ 60 %, ce qui limite la pollinisation et peut diminuer de 10 % la formation des fruits [23]. Au final, ce sont certains services écosystémiques qui sont menacés [24].

La lumière artificielle désynchronise également les horloges biologiques des animaux, aussi bien nocturnes que diurnes. Par exemple, une activité de nuit est désormais constatée chez des passereaux [25] ou des rapaces diurnes [26]. Concernant les espèces diurnes, les effets de la pollution lumineuse, qui remet en cause l'alternance naturelle jour/nuit d'une manière générale, vont au-delà de la synchronisation biologique. Elle peut affecter, par exemple, la position des nids des mésanges en ville [28].

Les végétaux sont également concernés : l'ouverture des bourgeons des arbres en ville peut être avancée d'environ une semaine en raison de l'éclairage artificiel [27] et la chute automnale des feuilles retardée.



© Romain Sordello

Arbre dont la chute automnale des feuilles est retardée sur la partie soumise toutes les nuits à la lumière d'un lampadaire.

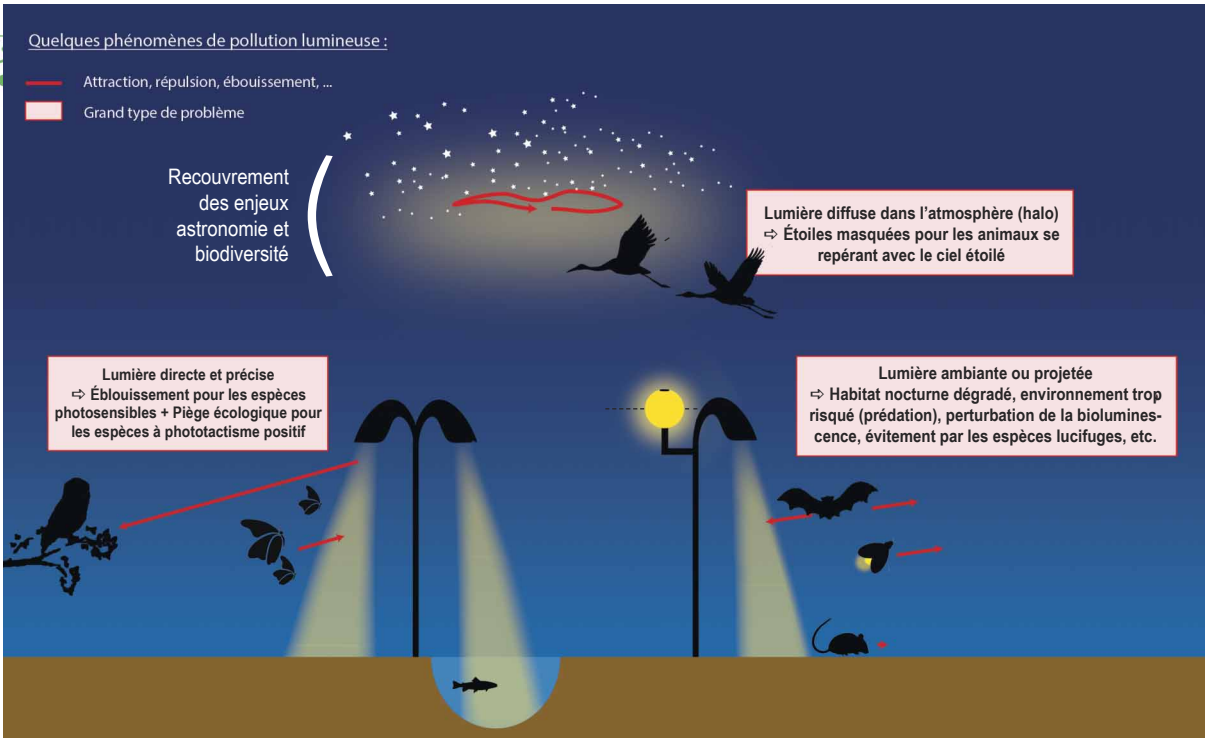
Les effets de la lumière artificielle sur la biodiversité peuvent avoir diverses origines (Figure 5) :

- lumière directe (éblouissements, lumières intrusives...) ;
 - luminosité ambiante et lumières projetées (au sol, sur les feuillages, dans l'eau) ;
 - lumière diffuse dans l'atmosphère (halo lumineux généré à la fois par la diffusion de la lumière émise par le luminaire et par sa réverbération par le sol, qui masque le ciel étoilé servant de repère aux espèces nocturnes).
- Par ailleurs, les effets peuvent être dus à la quantité de lumière [29], à sa **composition*** [30] ou encore à la temporalité de l'éclairage [31] (horaires, durées, clignotement ou intermittence...) ;

En l'état des connaissances, l'éclairage artificiel nocturne ne semble avoir que des effets néfastes sur la biodiversité. Des travaux récents ont en effet montré que même pour les espèces supposément favorisées par la lumière - en l'occurrence certaines chauves-souris comme les pipistrelles - l'éclairage nocturne constituait en réalité une contrainte forte à l'échelle de leur répartition nationale [33]. Certains bénéfices peuvent apparaître très localement pour des espèces qui trouvent une nourriture abondante concentrée autour des lampadaires (insectes) mais cet effet ne se répercute pas positivement à une échelle plus large, y compris à l'échelle d'une

grande ville [34]. Une étude de 2018 a également montré que l'effet attractif des sources lumineuses sur les insectes nocturnes se manifestait déjà avec une quantité très faible de lumière (niveau d'éclairement* de l'ordre de 1 lux) [35]. De nombreuses publications montrent aussi que certaines espèces réduisent, voire cessent, leur activité sous l'influence de la pleine lune, dont l'éclairement est pourtant très faible (inférieur à 1 lux) [36]. Tous ces travaux justifient par conséquent que toute mesure allant dans le sens d'une réduction de l'éclairage nocturne est bénéfique pour la biodiversité. Les éclairages doivent donc être réduits au strict nécessaire ou supprimés, *a fortiori* au sein des continuités écologiques.

Figure 5



Principaux phénomènes de pollution lumineuse ayant des effets sur le vivant. Source : d'après Sordello, 2017 [32].

De fait, la suppression totale de l'éclairage nocturne ne peut être envisagée partout. Cela implique la nécessité de mener une vraie réflexion en amont pour une planification raisonnée de l'éclairage. Cette planification doit veiller à faire correspondre précisément l'éclairage aux besoins exprimés et questionner ces derniers, tout en prenant mieux en compte les enjeux de biodiversité et l'impact écologique de la lumière.

6



© Philippe Massit / OFB

Grand murin (*Myotis myotis*) en vol dans une cavité naturelle.



3 – Prise en compte de la pollution lumineuse dans la Trame verte et bleue

Depuis le Grenelle de l'environnement (2007), la prévention, la réduction et la limitation des nuisances lumineuses font l'objet d'une assise législative et réglementaire, imposant désormais certaines prescriptions en termes de gestion de l'éclairage la nuit et renforçant la prise en compte des enjeux environnementaux à ce sujet (voir Partie C).

En ce qui concerne plus précisément les continuités écologiques, les textes officiels restent cependant sommaires. En effet, lors de la définition du cadrage national de la politique TVB en 2007, la pollution lumineuse et son effet barrière n'étaient encore qu'une problématique émergente. Ceci explique que dans la version des ONTVB validée par le décret du 24/01/2014, la pollution lumineuse est citée une fois, parmi les « problématiques connexes à l'urbanisation » visées par l'objectif « de maîtriser l'urbanisation et l'implantation des infrastructures et d'améliorer la perméabilité des infrastructures existantes ». Dans le cadre de leur mise à jour liée à l'instauration des Sraddet, les ONTVB ont été consolidées sur différents enjeux émergents dont la pollution lumineuse (Encadré 2).

ONTVB et pollution lumineuse

Les ONTVB parues le 17 décembre 2019 prennent davantage en considération la pollution lumineuse que dans leur version initiale de 2014, de plusieurs manières :

- la définition des obstacles aux continuités inclut désormais ce type de pollution ;
- l'objectif de conservation et d'amélioration de la qualité des continuités écologiques prend en compte leur préservation vis-à-vis de la pollution lumineuse ;
- la ligne directrice sur les infrastructures linéaires de transport indique l'importance d'englober les effets diffus pouvant impacter des milieux distants, notamment via la pollution lumineuse ;
- le guide méthodologique sur les enjeux relatifs à la préservation et à la restauration de la biodiversité dans les Sraddet fait également référence à ces notions.

Notons que la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages d'août 2016 a modifié l'article L371-1 du code de l'environnement précisant les objectifs de la TVB. La TVB doit désormais tenir compte de la « gestion de la lumière artificielle la nuit ».

Malgré ce cadrage national sur la pollution lumineuse peu développé dans la TVB à ses débuts, ces enjeux ont été nettement soulignés au niveau régional dans les SRCE [37]. Les effets de la lumière artificielle nocturne sur la biodiversité et le rôle potentiel de la TVB sur cette thématique ont été mis en avant dans les diagnostics de plusieurs SRCE. Néanmoins, la pollution lumineuse est restée peu prise en compte dans l'identification des continuités écologiques régionales même si de nombreux SRCE ont utilisé des espèces intégralement ou partiellement nocturnes. En revanche, de nombreuses actions ont été prévues par certains SRCE à la fois pour approfondir les connaissances et pour réduire l'éclairage nocturne au sein des continuités. Ce bilan témoigne d'une dynamique enclenchée sur le long terme au niveau régional.

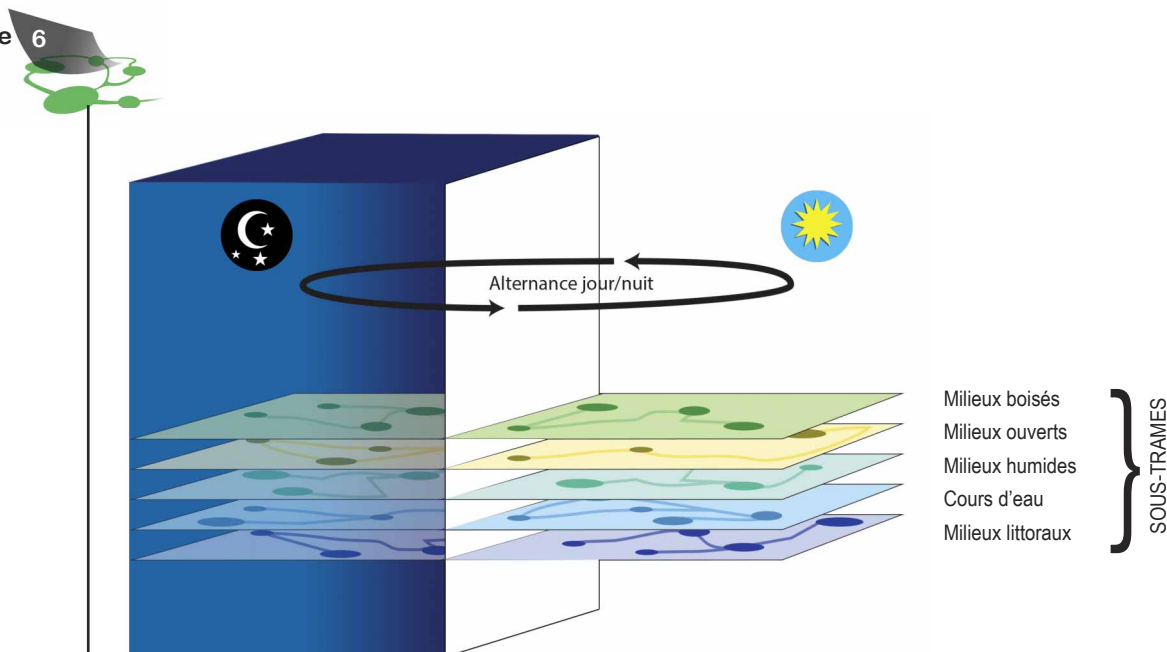


4 - Trame noire

Compte tenu de la dégradation, de la disparition et de la fragmentation des habitats naturels causées par la lumière artificielle, il apparaît indispensable de préserver et restaurer un réseau écologique propice à la vie nocturne : la **Trame noire*** [38]. La Trame noire peut ainsi être définie comme un ensemble connecté de réservoirs de biodiversité et de corridors écologiques pour différents milieux (sous-trames), dont l'identification tient compte d'un niveau d'obscurité suffisant pour la biodiversité nocturne.

Sur le plan conceptuel, la Trame noire est un moyen de reconnaître la dimension temporelle des processus écologiques (Figure 6). En effet, l'activité de la faune est cyclique à l'échelle d'une journée, on parle de **rythme nyctéméral***. Certaines espèces sont diurnes, nocturnes, voire les deux et d'autres sont essentiellement actives au crépuscule et/ou à l'aube. D'autres encore sont partiellement diurnes ou partiellement nocturnes. Certaines espèces s'adaptent aussi à la présence de l'homme en devenant plus ou moins nocturnes [39]. En revanche, le caractère nocturne reste en grande partie une caractéristique « intrinsèque » à chaque espèce, liée à ses facultés morphologiques, biologiques, physiologiques, sensorielles (système de vision, cycle hormonal...). Sur l'ensemble des animaux, on estime qu'environ 30 % des vertébrés et 65 % des invertébrés sont en tout ou partie nocturnes [40]. Cette périodicité peut engendrer des problématiques très spécifiques de fragmentation dues à la lumière artificielle, variables en fonction du moment dans le cycle journalier et des espèces concernées.

Figure 6



La Trame noire vise à prendre en compte la dimension temporelle (alternance jour/nuit), absente jusqu'à présent dans la Trame verte et bleue. Source : d'après Sordello, 2017 [38].

Pour s'inscrire dans le cadre général de la Trame verte et bleue, la Trame noire doit être constituée de réservoirs de biodiversité et de corridors écologiques caractérisés par la qualité de l'environnement nocturne et donc en particulier par l'obscurité. Ce réseau écologique doit lui-même se décliner en plusieurs sous-trames car la pollution lumineuse possède des impacts sur les cortèges d'espèces de tous les milieux, notamment les milieux aquatiques [41], les milieux humides [42], les milieux boisés [43], les milieux ouverts [44] ou encore les milieux littoraux [45]. Une Trame noire doit donc exister dans chacun de ces milieux.

Enfin, des actions de réduction des impacts, via une gestion adaptée de l'éclairage nocturne, doivent aussi être prévues et mises en œuvre dans et en dehors de la Trame noire, pour y maintenir et/ou y restaurer l'obscurité nécessaire à la vie la nuit [46]. Une action en dehors des continuités écologiques est aussi fondamentale car les nuisances lumineuses agissent à distance (attraction/répulsion par exemple).

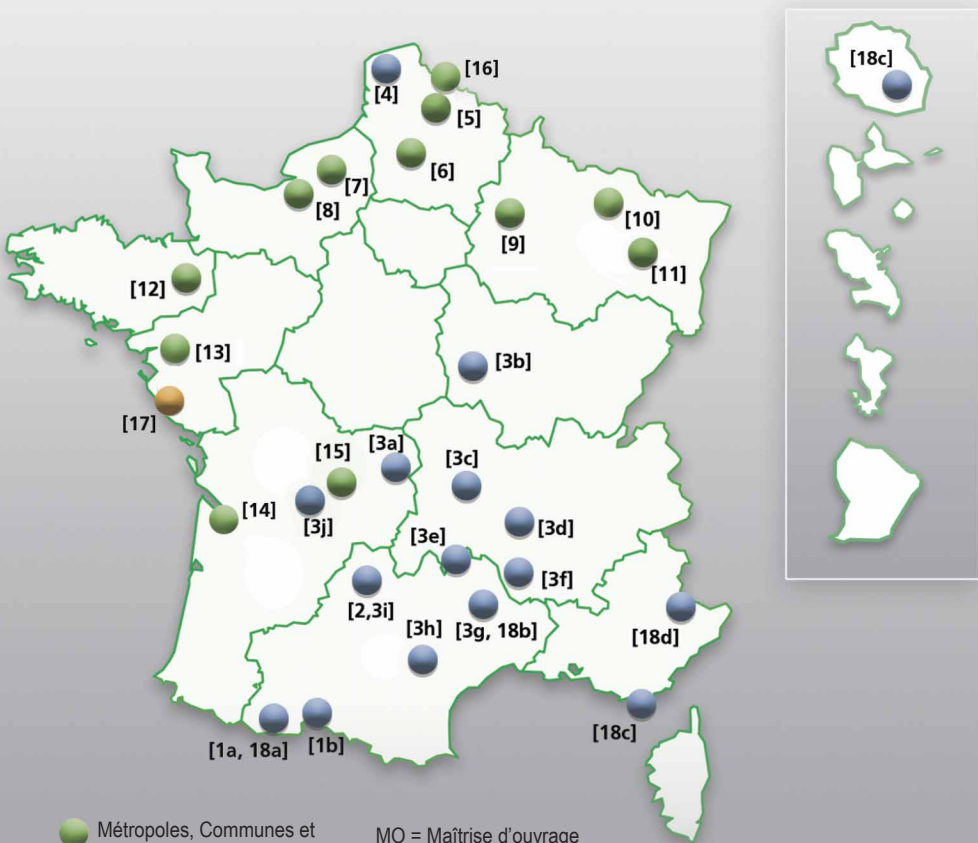
Plusieurs projets de Trames noires ont déjà été engagés et même achevés ces dernières années en France via des démarches exploratoires émanant d'acteurs locaux [47]. Parmi ces acteurs « pionniers » on retrouve des espaces naturels et en particulier les parcs nationaux - notamment en premier lieu le Parc national des Pyrénées - et les parcs naturels régionaux (PNR) tels que le PNR des Causses du Quercy ou le PNR des Caps et Marais d'Opale [48]. De nombreuses communes et leurs groupements sont également moteurs comme les métropoles de Rennes, Lille [49], Nantes, Metz, Amiens, la ville de Douai ou encore le Scot des Vosges centrales (Figure 7) [50,51]. Enfin, on peut citer le projet original mené à l'échelle d'un département, commandité par le Syndicat départemental d'énergie et d'équipement de la Vendée. Notons que dans l'ensemble de ces projets, l'appellation de cette nouvelle « trame » peut varier, même si l'expression « Trame noire » semble majoritairement reprise (Encadré 3).

À notre connaissance, la France innove avec cette approche de réseau écologique nocturne pour le moment très peu développée à l'étranger, à l'exception de la démarche menée à Genève [52].

Question de terminologie

Différentes terminologies coexistent pour désigner ces réseaux écologiques prenant en compte l'obscurité. Le terme de Trame noire semble être le plus utilisé (7 SRCE l'employaient déjà en 2015 et c'est aussi ce terme que l'on retrouve dans la majorité des projets concrétisés depuis sur les territoires). Il présente l'intérêt d'être dans la continuité des adjectifs de couleur, déjà choisis par le législateur dans l'appellation « Trame verte et bleue ». Cependant, on retrouve également l'expression « Trame sombre » utilisée par le Parc national des Pyrénées, le Parc national des Cévennes et le Syndicat départemental d'énergie et d'équipement de la Vendée. En Provence-Alpes-Côte d'Azur, le SRCE utilisait quant à lui la terminologie « Trame nuit ». Enfin, il est à noter que les expressions « trame nocturne » et « trame étoilée » sont des marques déposées à l'Institut national de la propriété industrielle (Inpi) par l'Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturne (ANPCEN).

Figure 7



- Métropoles, Communes et Communautés de communes
- Espaces protégés (Parcs nationaux, Parcs naturels régionaux)
- Départements

MO = Maîtrise d'ouvrage
Prest. = Prestataire
PN = Parc national
PNR = Parc naturel régional
DSL = DarkSkyLab

[1] Projet "TRAME SOMBRE", 2015-2017
MO : [a] PN des Pyrénées et [b] PNR des Pyrénées ariégeoises
Prest. : DSL
[2] PNR des Causses du Quercy
Identification de zones de conflits avec la TVB dues à l'éclairage (2012)
[3] MO : IPAMAC ([a] PNR Millevaches en Limousin, [b] PNR Morvan, [c] PNR Livradois-Forez, [d] PNR Pilat, [e] PNR Aubrac, [f] PNR Monts d'Ardèche, [g] Parc national des Cévennes, [h] PNR Haut-Languedoc, [i] PNR des Causses du Quercy, [j] PNR Périgord-Limousin)
Prest. : DSL, RENOIR
[4] PNR Caps et Marais d'Opale
Prest. : TerrOïko, Cerema

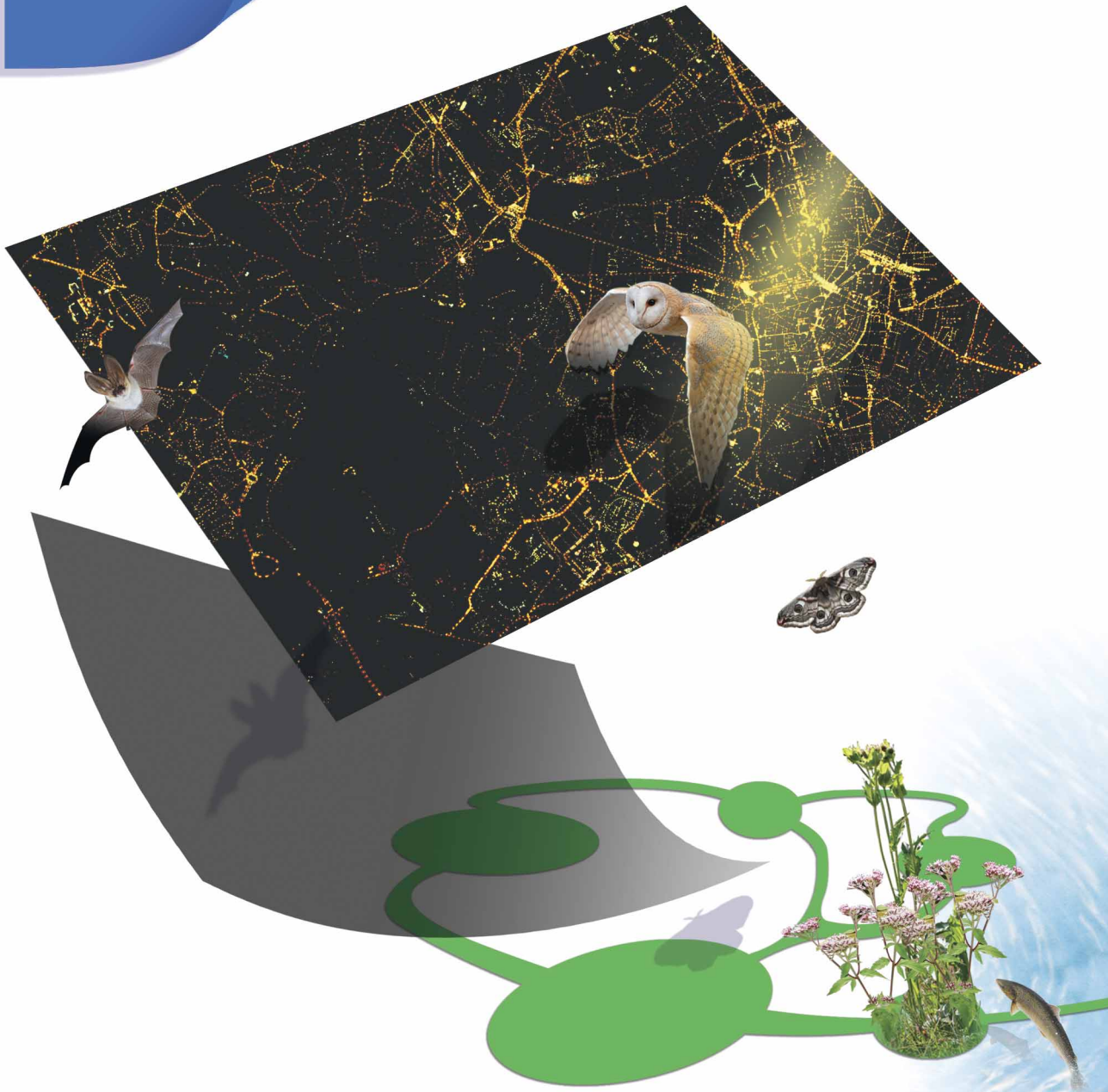
[5] MO : Ville de Douai
Prest. : Auddice
[6] MO : Amiens Métropole
Prest. : Biotope, Cerema, DSL
[7] MO : Seine-Eure
Prest. : Biotope, DSL
[8] MO : Lisieux-Normandie
Prest. : Biotope, DSL
[9] MO : PNR Montagne de Reims
Prest. : DSL
[10] MO : Metz Métropole
Prest. : DSL, TerrOïko, Auddice
[11] MO : Vosges centrales (SCOT)
Prest. : Atelier du territoire, Acere, DSL
[12] MO : Rennes Métropole (SDAL)
Prest. : Concepto
[13] MO : Nantes Métropole
Prest. : Cerema

[14] MO : Bordeaux Métropole
Prest. : DSL, TerrOïko, Auddice
[15] MO : Limoges Métropole
Prest. : Echo Chiro, DSL
[16] Projet "TRAME NOIRE", 2014-2017
Etude sur agglomération de Lille Métropole
Par Biotope avec CEFE/MNHN et Université de Lille 1 (appel à projet FRB/CR NDPC)
[17] MO : Vendée (SyDEV)
Prest. : Artelia et Luminescence
[18] MO : OFB/Parcs nationaux ([a] Pyrénées, [b] Cévennes, [c] Port-Cros, [d] Mercantour, [e] Réunion)
Prest. : DSL, TerrOïko, Auddice

N.B. : Cette carte ne présente que les démarches explicites relatives à la Trame noire telle qu'elle a été définie dans ce guide. Cette carte n'inclut donc pas toutes les actions menées en France contre la pollution lumineuse et en faveur de la biodiversité nocturne. En outre, cette carte n'est pas nécessairement exhaustive, elle présente les projets dont le Centre de ressources TVB a connaissance au moment de la rédaction de cet ouvrage.

Retrouvez la carte mise à jour sur la page dédiée du site du centre de ressources Trame verte et bleue : <http://www.trameverteetbleue.fr/tramenoire>

Carte des projets de Trames noires.



- 25 ■ 1 - Première approche : identifier les secteurs à enjeux et/ou les points de conflits
- 27 ■ 2 - Identifier la Trame noire
- 29 ■ 3 - Analyse comparative
- 43 ■ 4 - Cartographier la pollution lumineuse
- 54 ■ 5 - Espèces modèles



Pour identifier et cartographier la Trame noire, il existe différentes approches allant d'une prise en compte de la pollution lumineuse dans la Trame verte et bleue jusqu'à l'identification précise d'une Trame noire [32]. Les démarches diffèrent selon la situation de départ - avec ou sans une TVB existante - et les objectifs recherchés (ex. : préserver les secteurs en bon état ou restaurer prioritairement certains espaces).

Cette partie présente ainsi :

- une première approche pour **identifier des secteurs à enjeux sur lesquels fixer des prescriptions en termes d'éclairage ou bien identifier des points de conflits à restaurer prioritairement** (par exemple entre la Trame verte et bleue et la pollution lumineuse) ;
- plusieurs méthodes pour **identifier une Trame noire *sensu stricto*** :
 - en l'extrayant d'une TVB déjà identifiée. On parlera alors d'**approche déductive**,
 - en intégrant la pollution lumineuse au cours de la phase d'identification des continuités écologiques, comme facteur de dégradation (parmi d'autres). On parlera alors d'**approche intégrative**.

Cette partie fait également le point sur les **sources d'information existantes** pour cartographier la pollution lumineuse et sur les **espèces modèles** sur lesquelles se focaliser pour aborder les continuités écologiques nocturnes.

Des fiches de retours d'expérience illustrent les différentes méthodes présentées.

Comment concrètement engager une étude de Trame noire sur son territoire ? Un **cahier des charges « type » est proposé en annexe 1** pour aider les collectivités souhaitant engager un marché public pour un projet de Trame noire. Il répond aux besoins d'acquisition de connaissance sur la pollution lumineuse et le patrimoine naturel nocturne du territoire, d'identification de la Trame noire et de maintien et de restauration de l'obscurité (zones de conflits à résorber, plan d'actions, suivi/évaluation).



1 – Première approche : identifier les secteurs à enjeux et/ou les points de conflits

Une première approche relativement facile à mettre en œuvre peut consister à identifier des points de conflits entre l'éclairage artificiel et des secteurs à enjeux devant être préservés pour la biodiversité. Cette méthode se veut opérationnelle et facilement compréhensible pour les acteurs de terrain comme les collectivités. Elle ne vise pas à identifier une Trame noire à proprement parler mais elle permet de hiérarchiser les mesures de restauration à engager là où l'éclairage pose des problèmes particuliers pour la biodiversité (Figure 8 page suivante).

Étape 1 - Identifier les secteurs à enjeux de biodiversité

Ces secteurs peuvent comprendre :

- **les continuités écologiques** (réservoirs de biodiversité et corridors) dans le cas où une TVB a déjà été identifiée sur le territoire ;
- **les zonages d'inventaire et réglementaires liés à la biodiversité** : ZNIEFF (Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique), sites Natura 2000, réserves, ENS (espaces naturels sensibles), sites classés au titre du patrimoine naturel, arrêté préfectoral de protection de biotope, sites gérés par le Conservatoire du littoral, les conservatoires d'espaces naturels, forêts domaniales, espaces boisés classés, etc. ;
- **les sites d'intérêt local qui sont supports de biodiversité** : zones bocagères, secteurs de vieux vergers, bois ou forêt communale, mosaïque d'habitats naturels et semi-naturels, certains espaces agricoles, espaces verts, parcs et jardins, grottes et secteurs présentant de nombreuses cavités, etc. Pour certaines espèces particulièrement sensibles à la pollution lumineuse, leurs espaces de vie peuvent être localisés en faisant appel à des inventaires ou à des spécialistes (voir 5 - Espèces modèles) ;
- **les cours d'eau et les zones humides** : les écosystèmes liés aux cours d'eau et zones humides étant sensibles à la pollution lumineuse, il est préconisé de les retenir de façon systématique. À noter que l'arrêté du 27 décembre 2018 (Partie C) précise que les installations d'éclairage ne doivent pas éclairer directement les surfaces en eau (cours d'eau, plans d'eau, etc.) ainsi que le domaine public maritime (DPM), parties terrestre et maritime.

Étape 2 - Cartographier la pollution lumineuse

La pollution lumineuse peut être cartographiée à partir de données relatives aux points lumineux, ou d'images satellites ou aériennes, pouvant être complétées par des données de mesure au sol (voir 4 - Cartographier la pollution lumineuse).

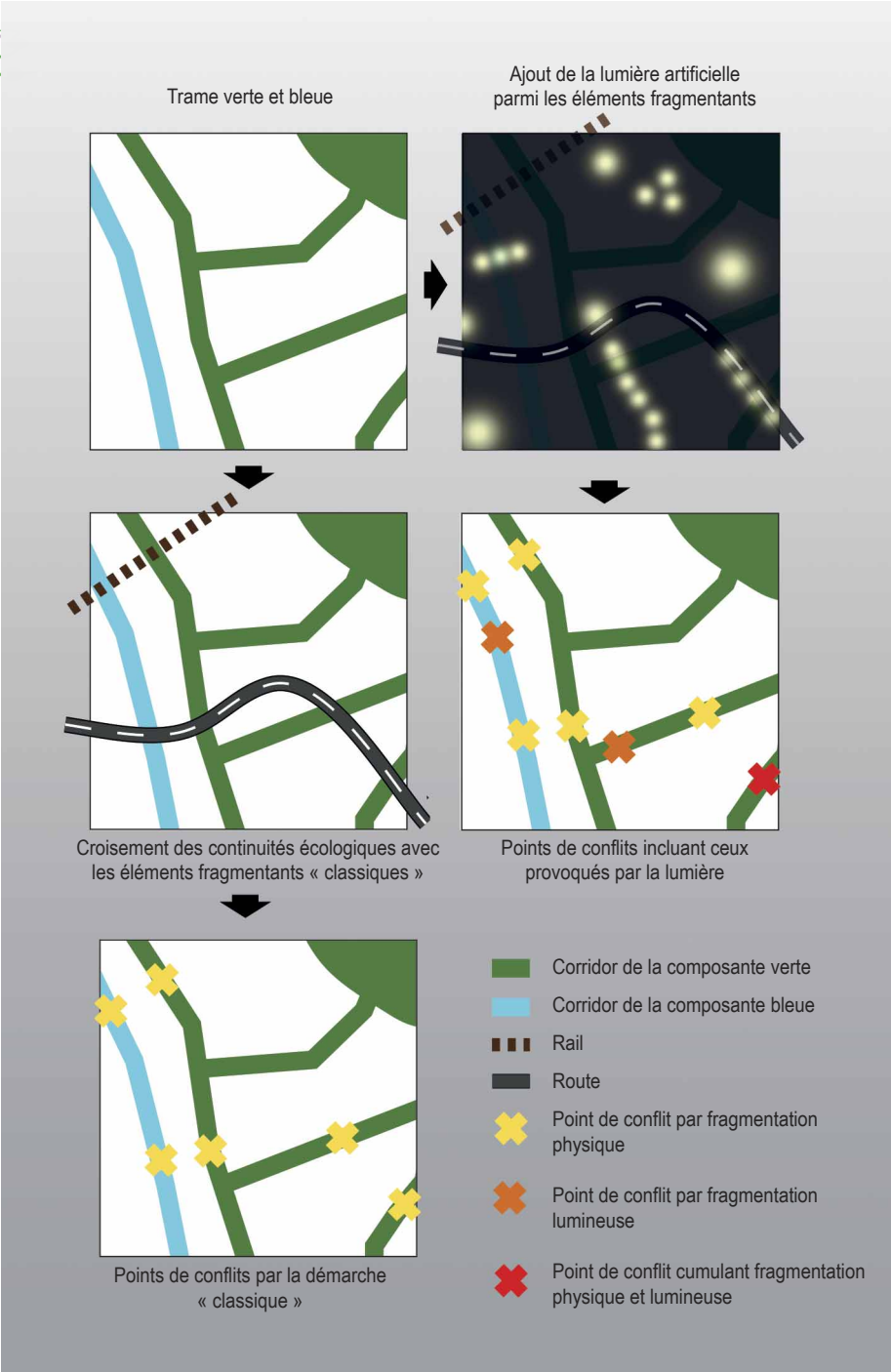
Étape 3 - Croisement cartographique dans le but d'identifier les points de conflits

Le croisement entre la carte des secteurs à enjeux (étape 1) et la carte de la pollution lumineuse (étape 2) va permettre d'identifier les points de conflits.

Cette méthode est une proposition qui a vocation à être reprise, testée, adaptée aux enjeux locaux et caractéristiques du territoire d'étude, et améliorée. Une étude pilote et exploratoire a déjà été menée en suivant cette méthode par le PNR des Causses du Quercy [53]. Des cartographies de pollution lumineuse ont été superposées aux différentes sous-trames de la TVB du Parc afin d'identifier d'éventuelles zones de conflits avec la lumière artificielle (Retour d'expérience 1).

Une autre démarche peut aussi consister à s'arrêter à l'étape 1 (espaces à enjeux) afin de fixer ensuite des prescriptions d'éclairage en fonction du niveau d'enjeux des différents secteurs. À l'échelle de la Vendée, les bureaux d'étude Artelia et Luminescence ont mené cette démarche en réponse à une demande du Syndicat départemental d'éclairage et d'équipement de la Vendée (Retour d'expérience 2).

Figure 8



Identification de points de conflits dus à la fragmentation physique et/ou à la lumière artificielle.
Source : d'après Sordello, 2017 [54].



2- Identifier la Trame noire

Comme défini précédemment, la Trame noire constitue un réseau écologique connecté constitué de réservoirs de biodiversité et de corridors écologiques, par sous-trames. Ce réseau doit donc être identifié. L'objectif est de caractériser les espaces où l'obscurité est encore actuellement suffisante pour la biodiversité nocturne. C'est un véritable enjeu d'identifier ces espaces afin de les préserver de toute dégradation à venir, la pollution lumineuse continuant à progresser chaque année en France. Deux principales approches apparaissent pour identifier cette Trame noire selon que le territoire concerné possède déjà ou non une Trame verte et bleue.

Approche déductive - Identification de la Trame noire en déduction de la TVB

La Trame noire peut être extraite *a posteriori* d'une TVB existante en délimitant ses zones les plus obscures. Avec cette approche, que l'on peut qualifier de « déductive », la Trame noire est donc incluse dans la TVB et en constitue la partie la plus propice à la biodiversité nocturne. C'est la démarche mise en place à Genève en Suisse (Retour d'expérience 3).

Les principales étapes pour mettre en œuvre cette approche sont les suivantes :

Étape 1 - Disposer de la cartographie de la TVB sur le territoire concerné

Étape 2 - Cartographier la pollution lumineuse sur le territoire concerné (voir 4 - Cartographier la pollution lumineuse)

Étape 3 - Superposer les deux cartes afin d'extraire de la TVB la partie la plus sombre, qui constituera la Trame noire

Approche intégrative - Dans le cas où il n'existe pas encore de TVB

En l'absence de Trame verte et bleue existante, la pollution lumineuse peut être intégrée parmi les facteurs réduisant la perméabilité du paysage lors de l'identification même des continuités écologiques. Avec cette approche, que l'on peut qualifier « d'intégrative », pour chaque sous-trame, la lumière artificielle est prise en compte en amont, à l'instar des autres critères de qualité des milieux. Le résultat est l'élaboration directement d'une seule Trame verte, bleue et noire (TVBN).

Concrètement, les réservoirs de biodiversité sont à caractériser selon les méthodes habituelles mises en œuvre pour la TVB, en ajoutant un critère supplémentaire d'obscurité et de qualité de la nuit (présence d'espèces indicatrices d'une bonne qualité de la nuit, occupation du sol prenant en compte l'obscurité, sélection de zonages existants situés dans des zones sombres). Certains secteurs/zonages reconnus ou labellisés pour la qualité de leur environnement nocturne, du fait de la faible pollution lumineuse qu'ils connaissent, peuvent aussi venir alimenter le socle de réservoirs de biodiversité de la Trame noire.

Concernant les corridors, la lumière peut être considérée comme un facteur de dégradation dans les méthodes de modélisation de la TVB basées sur la perméabilité des milieux. Rappelons que les corridors peuvent être appréhendés de plusieurs manières : linéaires, en pas japonais, diffus, paysagers, etc.

Qu'il s'agisse des réservoirs ou des corridors, une cartographie de la pollution lumineuse est nécessaire afin de connaître les espaces où l'obscurité est encore optimale pour la biodiversité.

Les principales étapes pour mettre en œuvre cette approche sont les suivantes :

Étape 1 - Identification des réservoirs

Identifier les espaces à l'aide d'espèces indicatrices d'une bonne qualité nocturne.

Recouper l'occupation du sol et les zonages existants avec la carte de pollution lumineuse afin de sélectionner les espaces ayant un niveau d'obscurité suffisant.

Sélection de tout ou partie des zonages existants déjà labellisés pour la qualité de leur environnement nocturne.

Étape 2 - Identification des corridors

Identifier les corridors reliant les réservoirs en intégrant l'obscurité comme un critère de qualité supplémentaire, par exemple dans les outils de modélisation habituels de la TVB (exemple : chemin de moindre coût, aires de dispersion, graphes paysagers, circuits électriques).

Étape 3 - Constitution de la Trame

Chaque sous-trame est constituée par adjonction des réservoirs et des corridors. L'exercice est reproduit pour les différentes sous-trames afin d'aboutir à une TVBN complète.

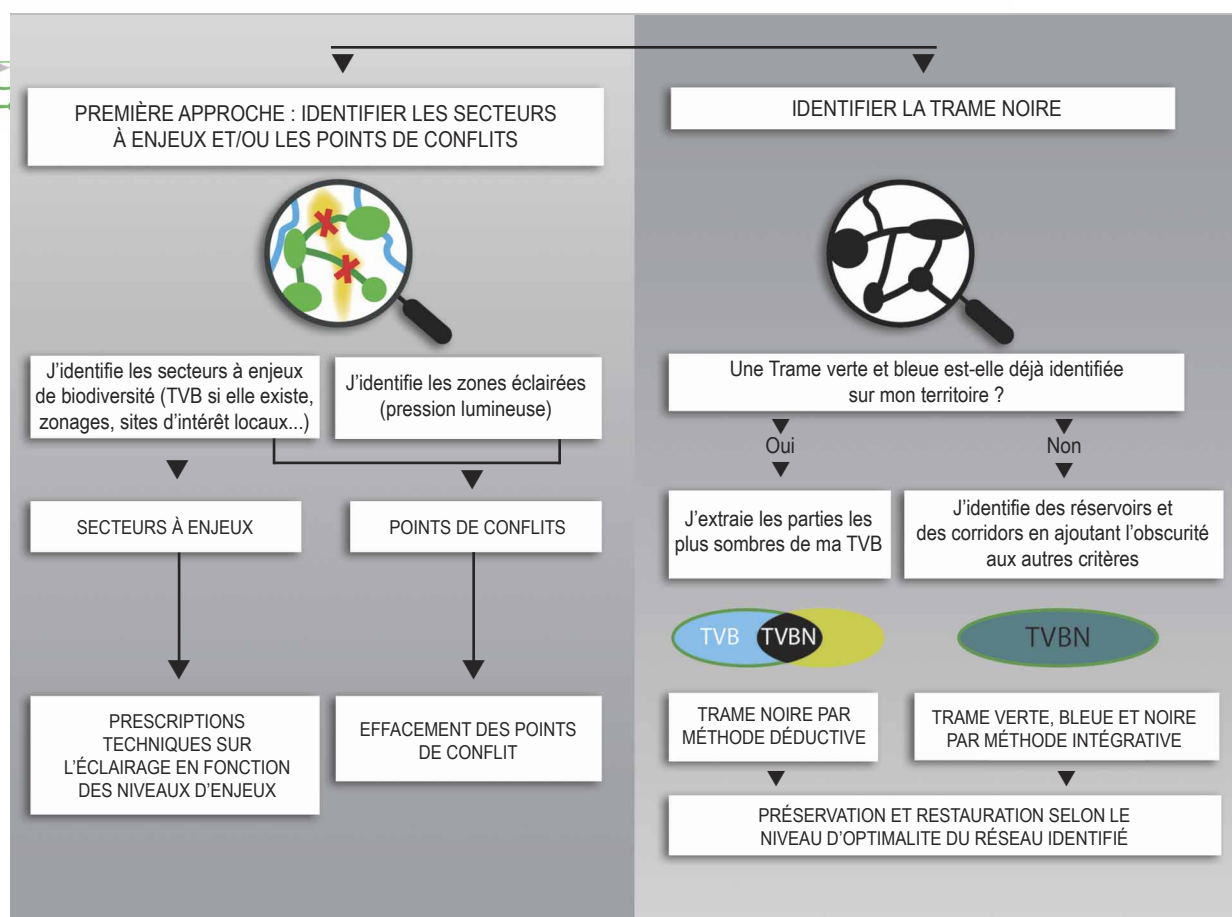
Cette méthode intégrative est encore en phase de recherche-développement. Elle a déjà été développée et testée sur le territoire de la métropole européenne de Lille, où existait cependant déjà une TVB (Retour d'expérience 4). C'est aussi la méthode adoptée sur le territoire de la ville de Douai (Retour d'expérience 5) et sur le territoire du Parc national des Pyrénées (Retour d'expérience 6). Dans cette dernière expérience, la pollution lumineuse a été utilisée comme critère pour dégrader le niveau de fonctionnalité des réservoirs de biodiversité et des corridors écologiques.



3 - Analyse comparative

Les approches visant à identifier les secteurs à enjeux et points de conflits n'aboutissent pas *stricto sensu* à une Trame noire, mais elles constituent des méthodes opérationnelles pour appréhender facilement les enjeux liés à la pollution lumineuse. Néanmoins, l'objectif reste de pouvoir situer précisément une Trame noire sur le territoire, c'est-à-dire d'identifier les espaces où l'obscurité est encore optimale pour la biodiversité afin de les préserver de toute augmentation de pollution lumineuse dans le futur. Pour cela, les deux méthodes, intégrative et déductive, ne produisent pas les mêmes résultats (Figure 9). Elles possèdent chacune des avantages et des inconvénients. En ce sens, l'existence d'une TVB n'empêche pas de choisir la méthode intégrative pour (ré-)identifier une nouvelle Trame verte, bleue et noire.

Figure 9



Arbre de décision pour adopter l'une des approches possibles. Source : d'après Sordello, 2017 [38].

Rappelons que ce guide est une première compilation de propositions méthodologiques. Les méthodes pour identifier la Trame noire sont en constante évolution au gré des nouveaux projets. Dans ce contexte, on peut évoquer justement le projet piloté par cinq parcs nationaux - Pyrénées, Réunion, Cévennes, Mercantour et Port-Cros - qui a vocation à approfondir les méthodes de cartographies et modélisations de la Trame noire et d'alimenter les réflexions nationales.

Tableau 1. Comparaison des différentes méthodes proposées. Source : d'après Sordello, 2017 [32]

Type de méthode		Avantages	Inconvénients	Objectif de la méthode
Identifier des secteurs à enjeux ou des points de conflits		Méthode plutôt facile à réaliser Méthode opérationnelle pour la mise en place d'actions Méthode applicable avec ou sans Trame verte et bleue préalable	Méthode qui ne constitue pas une Trame noire avec identification de réservoirs et de corridors	Répond à un besoin d'opérationnalité pour la mise en place d'actions de gestion, de réduction et de suppression de l'éclairage
Identifier la Trame noire	Identification de la Trame noire en déduction de la TVB existante (déductive)	Méthode facile à réaliser Construction à partir de l'existant (valorisation de la TVB préalablement identifiée)	L'obscurité n'est vue que comme un critère « additionnel » La Trame noire ne peut pas être plus étendue que la TVB, elle en constitue un « sous-produit »	Répond à un besoin d'identification d'une Trame noire, c'est-à-dire de réservoirs de biodiversité et de corridors sombres afin de les préserver de toute dégradation future
	Identification de la Trame noire en intégrant un critère d'obscurité dans la méthode de TVB (TVBN - intégrative)	L'obscurité est considérée avec autant d'importance que les autres critères de perméabilité du paysage	Méthode plus complexe à appliquer La TVBN est nécessairement plus restreinte que ce que serait la TVB puisqu'elle prend en compte en plus le niveau d'obscurité, ce qui peut éliminer des surfaces défavorables aux espèces nocturnes mais favorables aux espèces diurnes	

Cartographie des « obstacles lumineux » dans les Causses du Quercy



Porteur de projet

PNR des Causses du Quercy

Partenaires

MNHN, Fédération départementale des chasseurs du Lot, Cerema, ASF Vinci, communes, Région Occitanie, Europe (Feder)

Coût global

Cartographie de la TVB (sous-trames en environnement diurne) : 55 000 €

Impact de la pollution lumineuse sur le déplacement des espèces : 32 000 €

Contact

Marie-Clélia Lankester -
mclankester@parc-causses-du-quercy.org

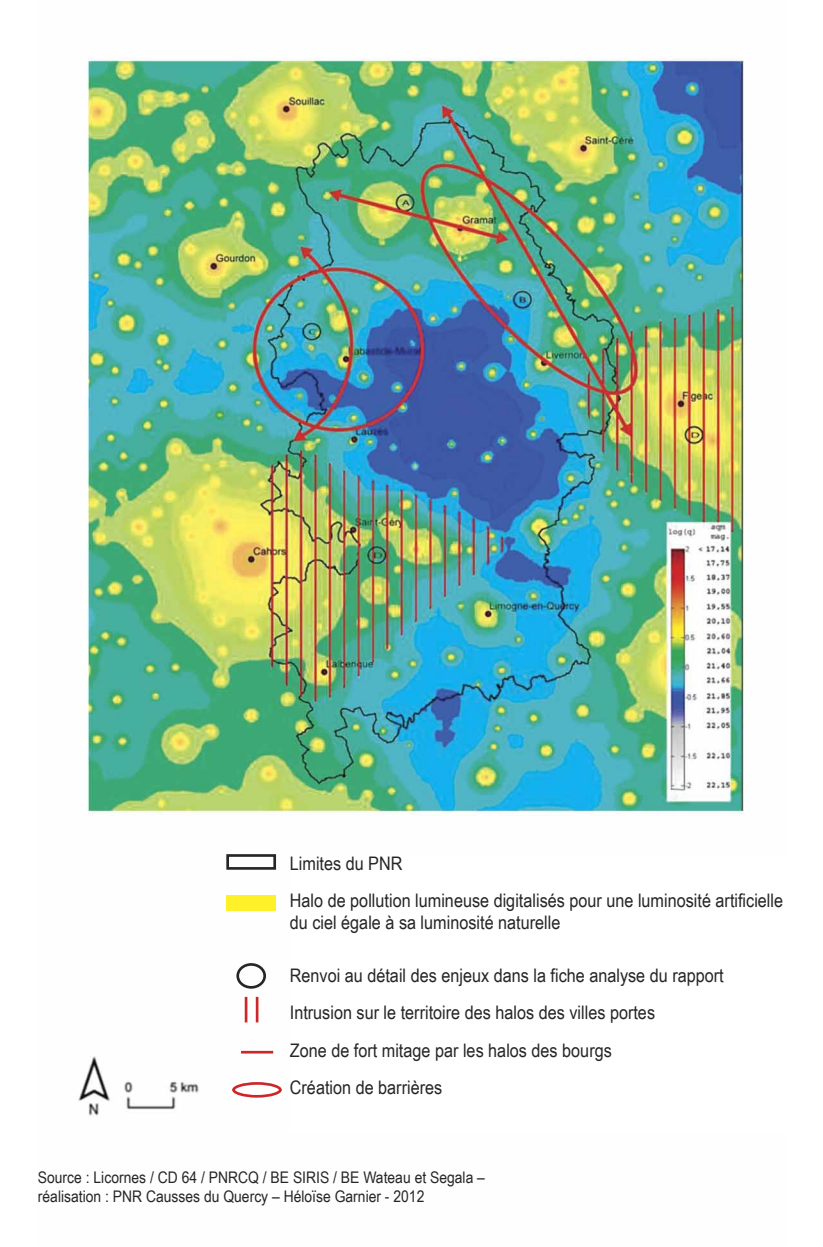
Réputé pour son « Triangle noir », meilleur ciel de France métropolitaine pour l'observation astronomique selon une carte publiée dans la revue « Ciel et Espace » en 2002, le Parc naturel régional des Causses du Quercy fait figure de pionnier dans la lutte contre la pollution lumineuse. En 2012 a été menée une étude d'identification des éléments nécessaires permettant d'intégrer le phénomène de pollution lumineuse comme élément fragmentant les continuités écologiques. Le but de l'étude était de mettre en évidence les éclairages intervenant comme « barrières » dans ce que le PNR appelle sa « Trame nocturne ». La méthode a consisté à :

- **choisir les espèces considérées** en se focalisant sur des espèces patrimoniales, nocturnes et lucifuges, puis à faire un bilan des modes de vie, habitats et comportements de ces espèces et à identifier des critères particuliers pour chacune : sous-trame prise en compte, période de l'année ou de la nuit de plus grande sensibilité, couleur des lampes plus ou moins impactantes ;
- réaliser une **analyse par milieu** à partir de la carte d'occupation du sol ;
- cartographier la **pollution lumineuse** à l'échelle du territoire et à une échelle plus large grâce à des outils de modélisation complétés de relevés de terrain ;
- superposer ces différentes données pour réaliser, sur la base de la TVB existante et des différentes sous-trames étudiées, **plusieurs cartes focalisées sur les insectes (lépidoptères et coléoptères nocturnes), les chiroptères (notamment le Grand rhinolophe) et les amphibiens**. Les particularités de chaque groupe d'espèces ont parfois conduit à des cartographies à plusieurs échelles.

Une carte bilan a été réalisée. Elle regroupe les principaux secteurs à enjeux en matière de continuités écologiques sur le fond de carte de la pollution lumineuse. Il a été établi une carte avant 1h du matin, et une après 1h du matin au regard des politiques d'extinction de l'éclairage public de certaines communes (Figure 10). Ce travail a nourri la déclinaison territoriale du SRCE Midi-Pyrénées et l'établissement d'une sous-trame « Obstacles lumineux » au 1/25 000^e.

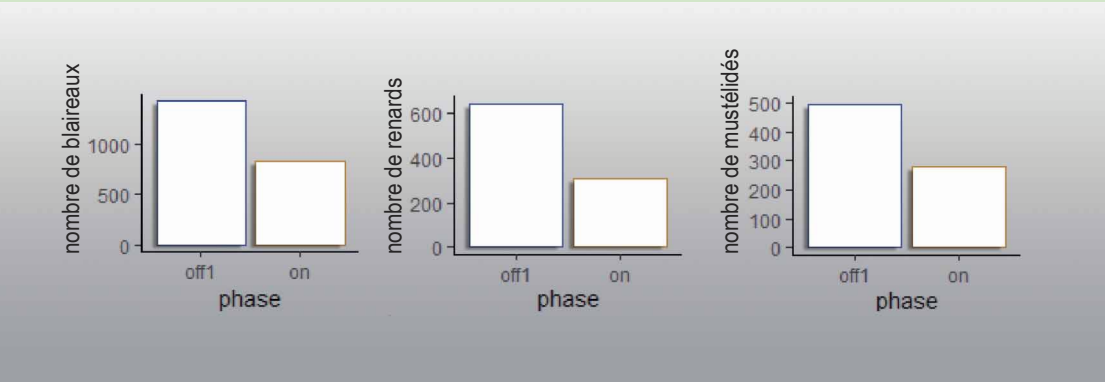
Après une phase exploratoire en 2016, le PNR met en œuvre depuis 2018 un protocole pour évaluer l'impact de l'éclairage artificiel sur le déplacement des mammifères terrestres nocturnes. Ce travail a conduit à la sélection de sites d'études constitués d'ouvrages sous l'autoroute A20, canalisant « naturellement » le passage de la faune. Ces sites ont été équipés d'un éclairage artificiel en LED. L'étude repose sur un protocole *before-during-after*, c'est-à-dire qu'elle comporte trois périodes consécutives d'un an chacune : premièrement une situation initiale sans éclairage (phase *before*), deuxièmement une condition éclairée (phase *during*) et troisièmement à nouveau une situation sans éclairage pour évaluer la résilience de la faune suivie (phase *after*). Pendant ces trois périodes, les déplacements des mammifères terrestres sont enregistrés à l'aide de pièges photographiques. Les premiers résultats permettent de constater des effectifs généralement plus élevés en phase *before* qu'en phase *during* (Figure 11).

Figure 10



Bilan des impacts de la pollution lumineuse sur la Trame nocturne du PNR des Causses du Quercy avant 1h du matin. Source : PNR des Causses du Quercy.

Figure 11



Histogramme du nombre d'individus de chaque espèce détecté durant la phase « before » (Off1) et « during » (On) pour tous les ouvrages. Source : PNR des Causses du Quercy.

Cartographie des « zones sensibles » et prescriptions associées en Vendée



Porteur de projet

Syndicat départemental d'énergie et d'équipement de la Vendée (SyDEV)

Partenaires

Bureau d'étude Luminescence (concepteur lumière) et agence Artelia (écologue).

Contact

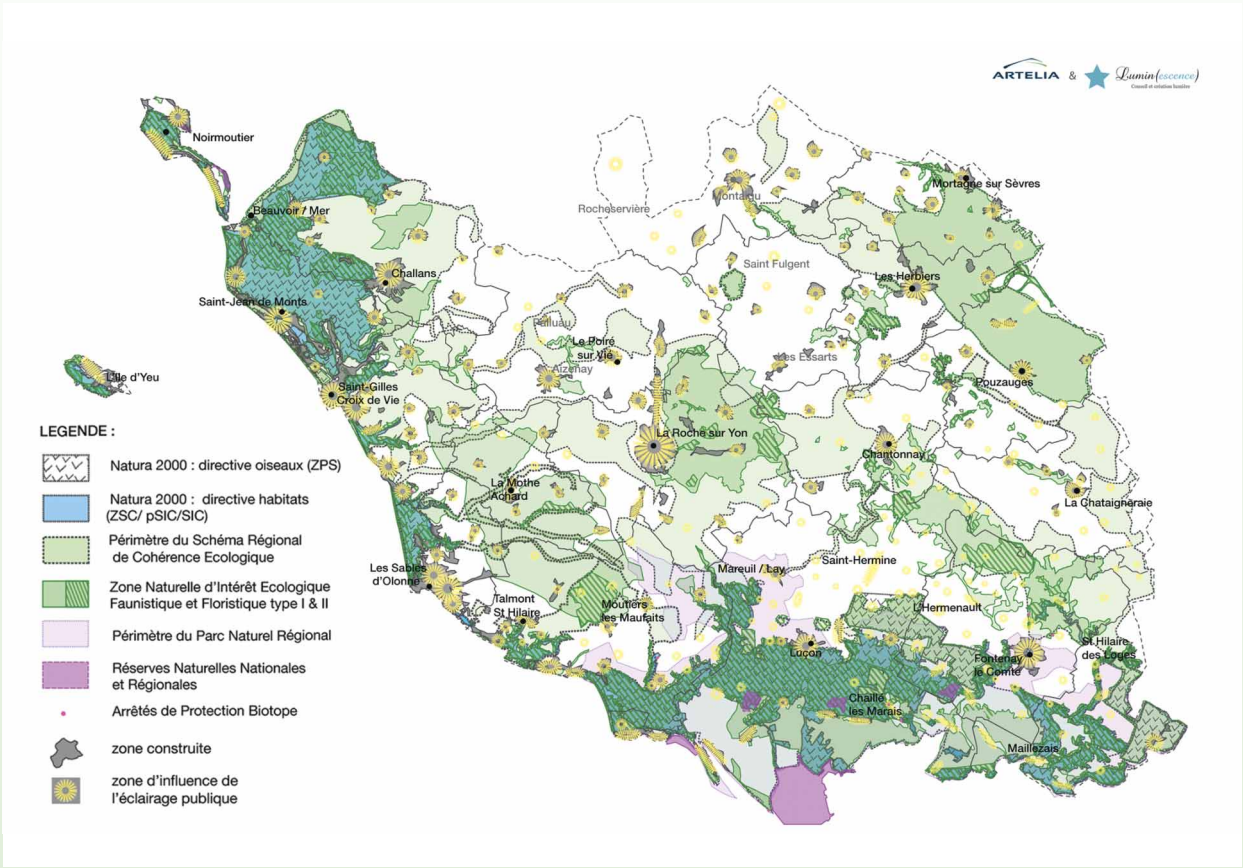
Alexandre Collonnier au SyDEV -
a.collonnier@sydev-vendee.fr

Le département de la Vendée compte plusieurs grandes agglomérations telles que la Roche-sur-Yon, les Sables-d'Olonne ou Fontenay-le-Comte, représentant approximativement 178 000 points lumineux dont plus de 158 000 sont exploités par le SyDEV. Dans le but de réduire les consommations et les nuisances lumineuses, le SyDEV incite les communes à rénover leurs parcs d'éclairage ce qui a permis depuis 2007 de réduire la consommation moyenne d'un point lumineux d'environ 40 %, grâce notamment à une réduction de 27 % des temps d'allumage (2 000 h en moyenne).

Une étude a été réalisée afin de mettre en place une démarche plus ciblée sur la biodiversité. Elle comprend plusieurs volets dont un premier a consisté à identifier les enjeux de biodiversité sur le territoire départemental. Pour cela, différentes couches de données ont été superposées : le Schéma régional de cohérence écologique des Pays de la Loire, les aires protégées et espaces remarquables (tels que les sites Natura 2000, les Réserves naturelles, les arrêtés de protection de biotope et les ZNIEFF notamment de type II pour leur pertinence vis-à-vis de l'échelle de travail au niveau départemental) et le PNR du Marais Poitevin. L'analyse biodiversité s'est intéressée aux espèces déterminantes de ces espaces naturels remarquables en valorisant les données bibliographiques en ligne. L'analyse s'est également attachée aux espèces de cohérence TVB en focalisant sur les espèces sensibles à la lumière. Le cumul des différentes couches de données a abouti à une cartographie des zones sensibles présentant différents degrés d'enjeux de préservation de la biodiversité nocturne sur le département.

Cette cartographie a été mise en relation avec les zones construites et les zones d'influence de l'éclairage dont les données très précises (positions exactes des points lumineux) sont détenues par le SyDEV (Figure 12). Pour chaque niveau de sensibilité, des prescriptions relatives à l'éclairage ont été établies permettant de déterminer des paramètres techniques précis, tels que la **température de couleur***, les niveaux photométriques, ainsi que la temporalité de l'éclairage (sa gradation et ses horaires d'extinction éventuels). Ces prescriptions s'adaptent progressivement selon les niveaux de « qualité de la nuit » souhaités (5 niveaux, du plus léger au plus dense). Cette approche permet ainsi d'instaurer une gestion différenciée de l'éclairage en fonction des enjeux de biodiversité et d'aller plus loin que la réglementation dans la mise en œuvre et la rénovation de l'éclairage dans les secteurs sensibles, permettant ainsi de préserver et restaurer à terme une Trame noire cohérente sur le département de la Vendée.

Figure 12



Carte des zones sensibles superposées avec les zones construites et d'influence de l'éclairage public. Source : SyDEV.

Continuum nocturne du bassin genevois



Porteur de projet
 Institut Terre-Nature-Environnement de la Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture et Institut des sciences de l'environnement de l'Université de Genève

Partenaire
 État de Genève et de la Confédération suisse

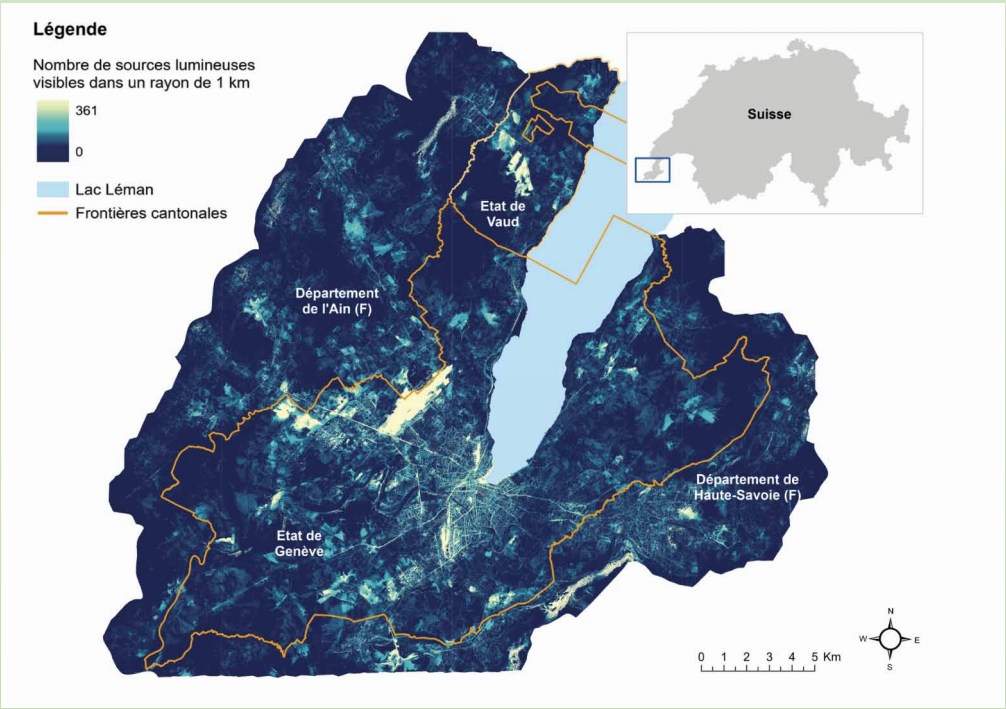
Coût global
 Acquisition des images : 37 000 €
 Analyse des images (3 mois): 62 000 €

Contact
 Joëlle Massy - joelle.massy@etat.ge.ch

Le *continuum* nocturne du bassin genevois a été établi selon une méthode consistant à cartographier l'ensemble des sources lumineuses nocturnes du bassin genevois afin d'identifier des zones du territoire faiblement ou fortement impactées par la pollution lumineuse [52]. La première étape a conduit à l'identification des 78 500 sources lumineuses du bassin genevois à partir de photographies aériennes nocturnes datant de 2013. La seconde étape a permis de modéliser leur visibilité sur le territoire avec une méthode de type « champ de vision » (*viewshed analysis*). Cette méthode permet de simuler la visibilité des sources lumineuses telles qu'elles peuvent être perçues par des espèces animales nocturnes de taille moyenne. Elle prend en compte des modèles numériques d'altitude révélant la topographie du terrain et les structures constituant des obstacles à la dispersion lumineuse (haies, arbres isolés, constructions, etc.). Elle permet donc de déterminer avec précision les zones du territoire qui sont le moins impactées par la lumière. Pour terminer, le *continuum* nocturne a été obtenu par intersection de ces données avec le réseau écologique genevois existant – constitué des trames verte (forêts, bosquets, arbres isolés), bleue (milieux aquatiques), rouge (prairies sèches), et jaune (agriculture extensive). On obtient alors le réseau écologique nocturne. L'analyse pourra être encore affinée pour prendre en compte des données d'éclairage (type d'ampoule, puissance des lampes, longueur d'ondes, etc.) et des spécificités écologiques de certaines espèces nocturnes qui réagiraient différemment à ces éclairages.

Cette cartographie (Figure 13) a pour objectif de conduire à la mise en place de solutions en faveur de la biodiversité nocturne de la région répondant aux objectifs de la Stratégie biodiversité Genève 2030 et de son infrastructure écologique.

Figure 13



Visibilité des sources lumineuses du bassin genevois. Source : [52].

Projet Tramenoire de la métropole européenne de Lille : volet écologique



Porteur de projet
 Consortium de recherche pluridisciplinaire : Bureau d'étude Biotope, Université de Lille I, Muséum national d'histoire naturelle, Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive

Partenaires
 Ville de Lille, métropole européenne de Lille, association Coordination mammalogique du Nord de la France, Région

Coût global
 150 000 €, dont 100 000 € pour le volet écologique

Contact
 Baptiste Faure - bfaure@biotope.fr

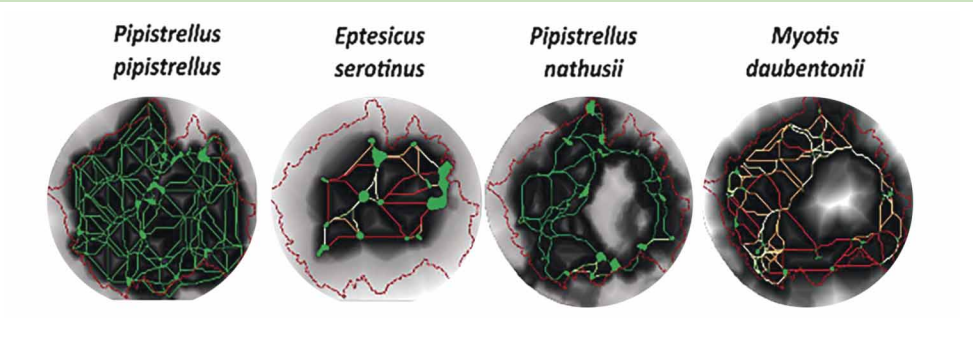
Le projet Tramenoire est un des projets pionniers sur ce sujet. Cette étude cherchait à :

- savoir s'il était possible de s'appuyer sur le réseau de corridors existants pour le développement d'une Trame noire locale ;
- connaître l'état de la connectivité écologique nocturne à l'échelle de la métropole ;
- identifier les pistes d'amélioration de cette connectivité par la réduction des niveaux de lumière.

En premier lieu, l'étude a mis en évidence que les milieux urbains et les territoires les plus anthropisés étaient loin d'être dénués de potentiels et d'enjeux écologiques pour les chauves-souris. La première session d'échantillonnage sur la base de points d'écoute nocturne, a permis d'obtenir 235 793 contacts de chauves-souris et suffisamment de données pour modéliser la probabilité de présence et l'abondance des quatre espèces suivantes : la Pipistrelle commune (*Pipistrellus pipistrellus*), la Pipistrelle de Nathusius (*P. nathusii*), la Sérotine commune (*Eptesicus serotinus*) et le Murin de Daubenton (*Myotis daubentonii*). Le modèle intègre différents paramètres environnementaux comme la présence d'eau ou d'arbres, l'urbanisation et les niveaux de lumière. Cette dernière a été mesurée à partir de données satellites (source : agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (NOAA), qui utilise les données de la Nasa).

Il ressort que le niveau de lumière influe significativement sur la distribution de ces quatre espèces. La connectivité des paysages a été modélisée en prenant en compte le rôle de la pollution lumineuse dans la résistance du paysage pour chacune des espèces. Du fait de la diversité des exigences écologiques des espèces étudiées, il a été démontré qu'il n'existait pas de Trame noire unique, mais plutôt un réseau de corridors dont les caractéristiques varient en fonction des espèces étudiées (Figure 14).

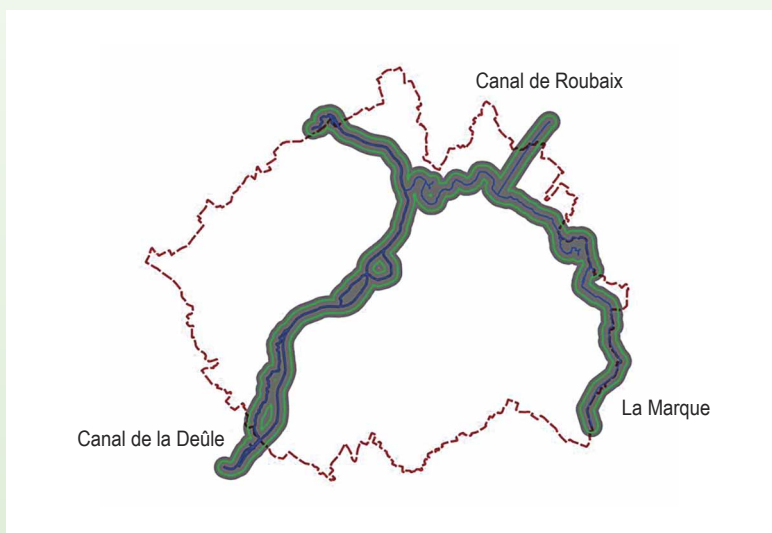
Figure 14



Modèles de connectivité du paysage pour le déplacement des chiroptères sur l'agglomération lilloise.

L'impact direct de l'éclairage est souvent difficile à distinguer d'autres paramètres, comme l'urbanisation, et sa perception est variable d'une espèce à l'autre. Les déplacements des chauves-souris en milieu urbain sont donc le fruit de compromis entre l'attrait pour la ressource alimentaire, la nécessité de trouver un gîte et la nuisance occasionnée par l'éclairage. L'approche multi-spécifique de cette étude a néanmoins permis d'identifier certaines des continuités écologiques communes à la plupart des espèces (Figure 15). Ces continuités sont en lien avec les cours d'eau présents sur l'aire d'étude : la Deûle, le canal de Roubaix et la Marque. Ces linéaires de milieux aquatiques généralement bordés de milieux naturels (parcs et boisements) constituent les principales continuités de la TVB déjà identifiées sur l'agglomération lilloise. L'identification d'une Trame noire par méthode intégrative, alors que le territoire était déjà doté d'une TVB, a permis de démontrer la cohérence entre l'approche Trame noire et la TVB existante.

Figure 15



Principales continuités écologiques de la Trame noire de la métropole européenne de Lille.

Le modèle permet de tester l'effet de quatre scénarios d'éclairage (réduction des puissances lumineuses dans les parcs urbains, les autoroutes, dans les communes de moins de 10 000 habitants et/ou de plus de 10 000 habitants) sur la fonctionnalité des corridors nocturnes, constituant ainsi un véritable outil d'aide à la décision.

Trame sombre de Douai



Porteur de projet

Ville de Douai

Partenaire

Bureau d'étude Auddicé biodiversité

Coût global

Étude sur la Trame sombre et les points de conflit : réalisée dans le cadre d'une thèse.

Enveloppe pour les travaux d'amélioration des luminaires et pour l'étude d'impact après travaux : 1,7 M€ HT.

Contact

Roger Couillet - rcouillet@ville-douai.fr

Douai s'inscrit dans un territoire avec de nombreux espaces où la biodiversité est importante : à moins de 10 km de la commune sont recensés 76 espaces naturels d'intérêt écologique comprenant des Espaces naturels sensibles (ENS), des Réserves naturelles régionales (RNR), le site Natura 2000 de la vallée de la Scarpe et de l'Escaut et des Zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF). Douai est également traversée de part et d'autre par la Scarpe qui constitue un corridor écologique identifié dans la Trame verte et bleue régionale. Un modèle prédictif d'élaboration de trame sombre a été testé à l'échelle communale sur la ville de Douai.

L'étude a ainsi visé à :

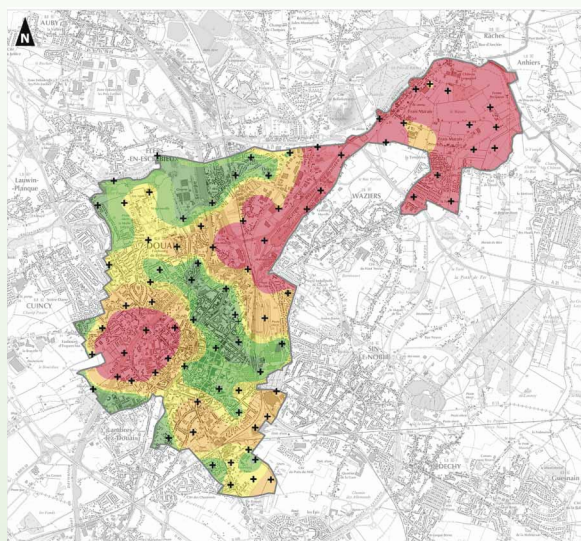
- élaborer la trame sombre de la ville ;
- identifier les points de « conflits » entre l'éclairage artificiel et les corridors écologiques ;
- proposer des prescriptions de gestion pour un éclairage durable.

Pour atteindre ces objectifs, 80 points d'écoute nocturne des chauves-souris ont été déployés sur l'ensemble de la commune en juin 2018. L'analyse des sons a été réalisée avec le logiciel Tadarida développé par le Muséum national d'Histoire naturelle. À l'issue de cet échantillonnage, les analyses statistiques n'ont pas permis de définir avec suffisamment de robustesse si l'activité observée des chauves-souris était principalement liée à l'éclairage ou à d'autres éléments structurant le paysage (végétation, points d'eaux, etc.). Néanmoins, une tendance à l'évitement de l'éclairage artificiel par les Murins, les Sérotines et les Noctules a clairement été identifiée.

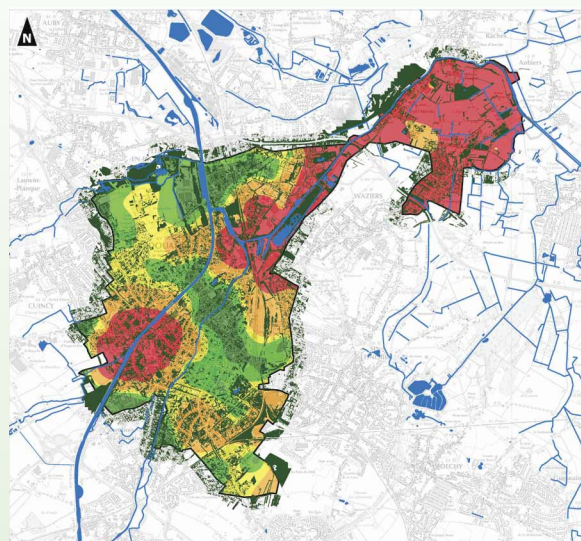
Avec l'appui de la bibliographie scientifique et en admettant que les tendances observées correspondent à la réalité, la trame sombre a été définie en se basant sur les continuités écologiques existantes ainsi que les zones d'activité des Sérotines et des Noctules dévoilées dans le cadre de l'étude (Figure 16).

Les luminaires d'éclairage extérieur « sensibles » vis-à-vis de la trame sombre ont été identifiés et des actions d'adaptation de ces équipements ont pu être ciblées. Ainsi, la ville de Douai prévoit d'améliorer la qualité des corridors sur la commune en adaptant technologiquement ces luminaires, leurs modes de fonctionnement et les temporalités d'éclairage.

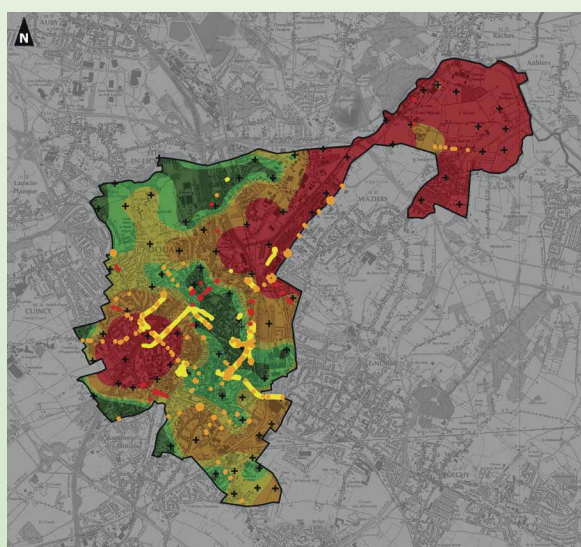
Figure 16



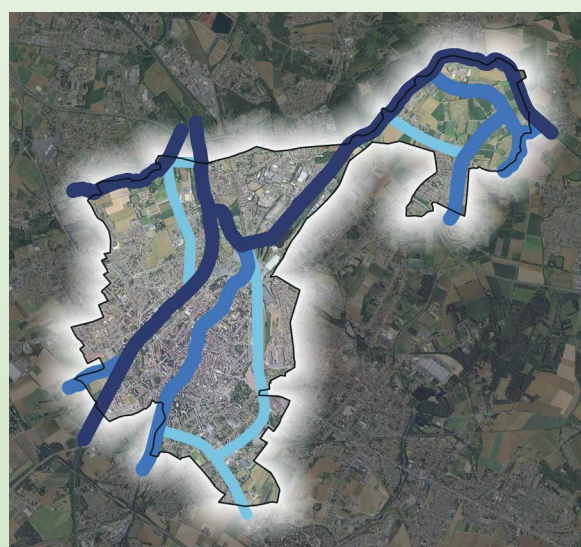
Concentration de l'activité des Sérotones et Noctules (de rouge : forte activité ; à vert : faible activité) et points d'échantillonnage (points noirs).



Concentration de l'activité des Sérotones et Noctules et zones végétales (aplats vert foncé) et surfaces en eau (aplats et linéaires bleus).

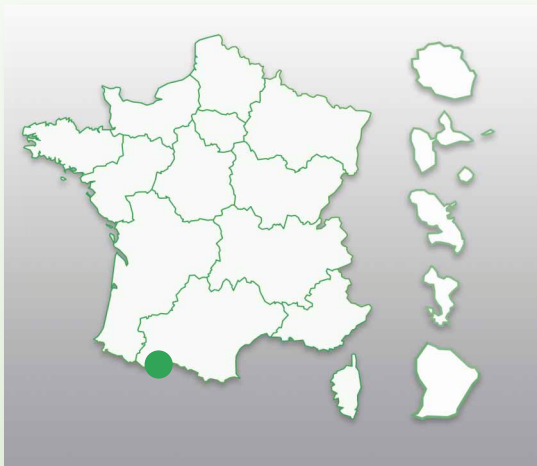


Concentration de l'activité des Sérotones et Noctules et localisation des luminaires supérieurs à plus de 3 000 K.



Trame sombre de Douai (Trame principale en bleu foncé, secondaire en bleu intermédiaire et tertiaire en bleu clair).

Trame noire du Parc national des Pyrénées



Porteur de projet

Parc national des Pyrénées

Partenaires

Bureau d'étude DarkSkyLab, Cerema

Coût global

Élaboration de la TVB : 120 000 €

Élaboration de la carte de pollution lumineuse et définition des seuils : 24 000 €

Achat de batloggers : 10 000 €

Analyse acoustique et statistique : 10 000 €

Contact

Eloïse Deutsch - eloise.deutsch@pyrenees-parcnational.fr

Olivier Jupille - olivier.jupille@pyrenees-parcnational.fr

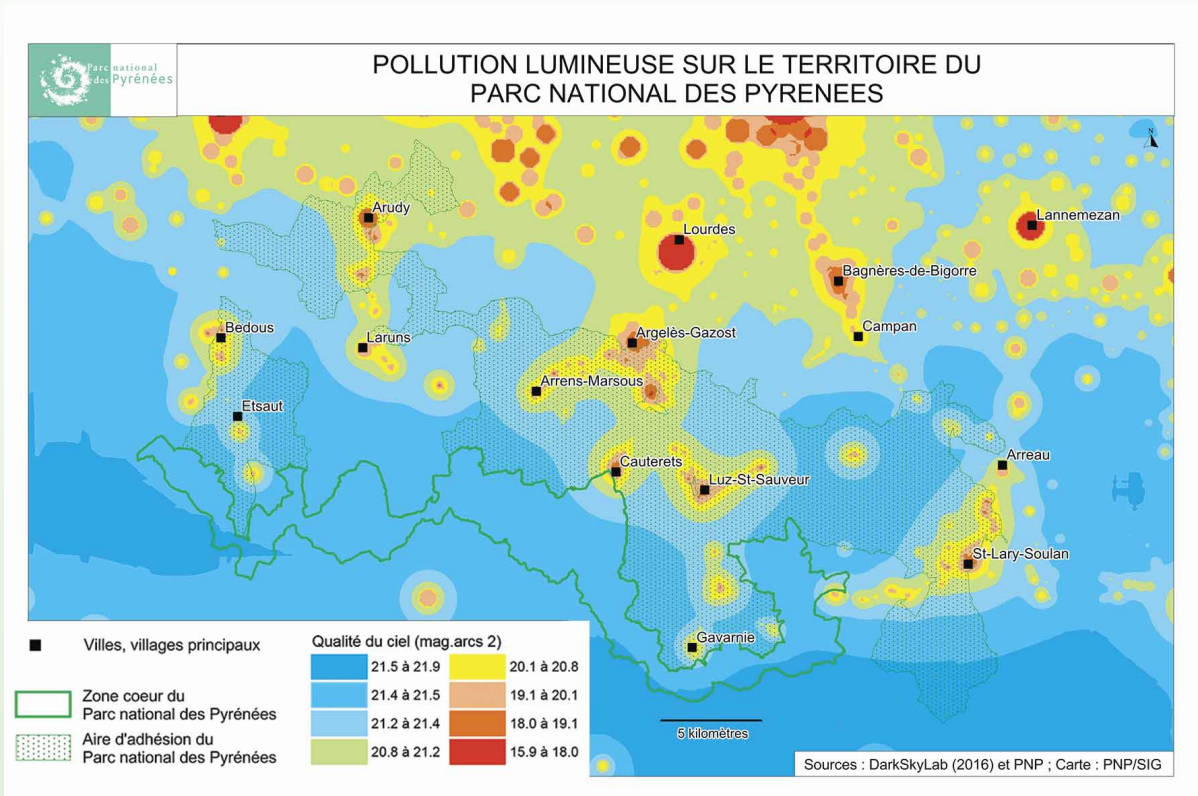
Le Parc national des Pyrénées est un des trois co-porteurs de la Réserve internationale de ciel étoilé (Rice) du Pic du Midi, première Rice de France classée en 2013 (Partie C). Particulièrement sensible au sujet de la pollution lumineuse, le Parc a souhaité intégrer cette problématique de la Trame verte et bleue de son territoire. Une modélisation précise (à l'échelle du lampadaire) de la qualité du ciel étoilé a été réalisée et un seuil de sensibilité à la pollution lumineuse pour certains chiroptères lucifuges a été défini. Dans un premier temps, un outil de modélisation a été développé. Ce logiciel utilise des bases de données référençant la géolocalisation des sources lumineuses et leurs caractéristiques physiques et techniques. Chaque point lumineux est caractérisé en particulier par sa puissance ou son ULOR (*Upward Light Output Ratio*), c'est-à-dire la quantité de lumière émise au-dessus de l'horizontale et directement perdue vers le ciel. Le modèle permet de produire des cartes de pollution lumineuse haute résolution en lien avec les réseaux d'éclairage. Les modélisations ont été consolidées par des relevés de terrain. Cette méthode a permis de développer des cartes précises. Celles-ci présentent un dégradé de couleurs représentatif de la qualité du ciel (Figure 17). À chaque couleur correspond une mesure de **noirceur du ciel nocturne***. L'unité de ces mesures est la magnitude par arc seconde au carré ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$). La couleur rouge indique une mauvaise qualité de ciel ($17,20$ à $18,37 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$) et le bleu foncé-blanc une très bonne qualité du ciel ($21,85$ à $24 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$). La luminosité naturelle du fond du ciel, sans lune, est en moyenne estimée à $21,6 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ et un ciel pur serait de $24 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$.

Dans un second temps, ont été récoltées puis utilisées des données d'observation existantes de deux espèces et une famille de chauves-souris lucifuges : le Grand Rhinolophe, le Petit Rhinolophe et les Murins. En comparant la présence de ces espèces aux données de pollution lumineuse, leur seuil de sensibilité à la lumière a pu être établi à $21,3 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$.

Le Cerema Sud-Ouest, missionné par le Parc national pour la réalisation de son schéma TVB, a ensuite intégré ce seuil lors de la modélisation des réservoirs de biodiversité puis des corridors écologiques qui les relient. La pollution lumineuse a ainsi fait partie des critères permettant d'identifier si un espace pouvait être considéré comme un réservoir de biodiversité. Une note a été attribuée en fonction de ces différents critères. Ainsi :

- les réservoirs potentiels situés dans des zones de faible pollution lumineuse avec des valeurs de plus de $21,3 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ ont une note qui n'est pas dégradée ;
- les réservoirs potentiels situés dans des zones de pollution lumineuse moyenne avec des valeurs comprises entre 20 et $21,3 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ ont une note dégradée de - 1 point ;
- les réservoirs potentiels situés dans des zones de forte pollution lumineuse avec des valeurs inférieures à $20 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ (valeur coïncidant le plus souvent à des espaces fortement urbanisés) ont une note dégradée de - 2 points.

Figure 17



Modélisation de la pollution lumineuse sur le territoire du Parc national des Pyrénées. Source : Daskylab et PN Pyrénées.

Les réservoirs potentiels définitivement retenus pour la TVB devaient avoir une note finale supérieure ou égale à :

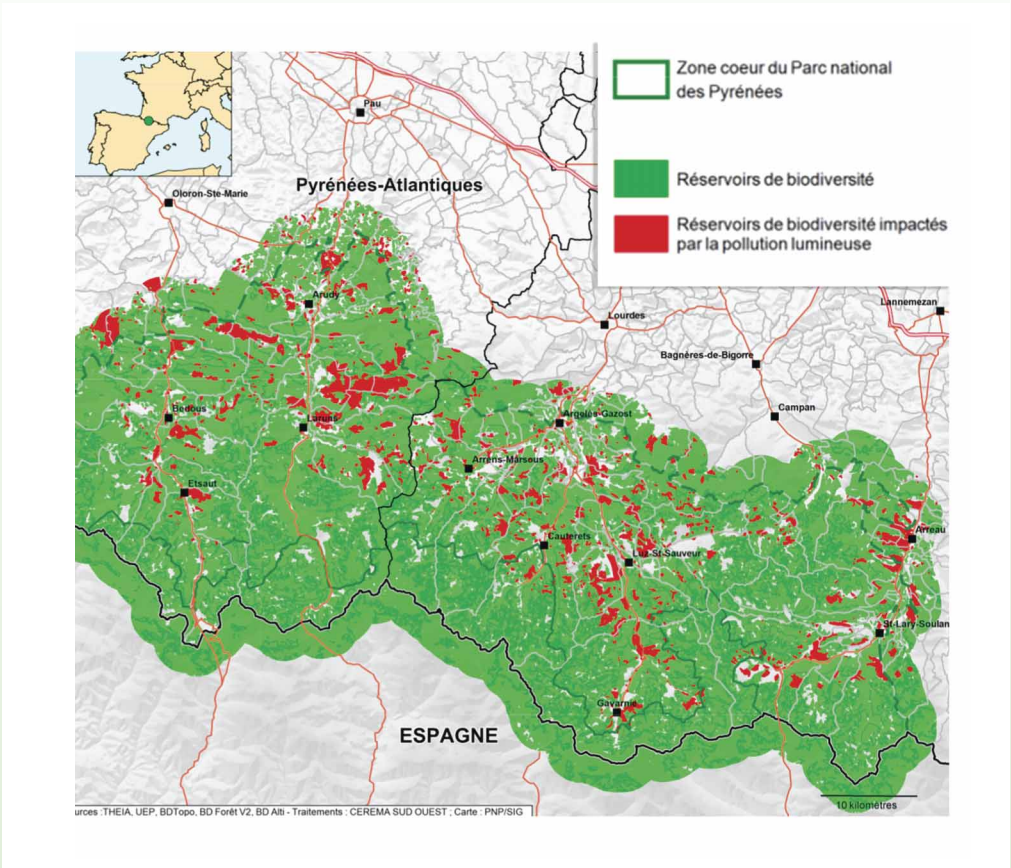
- 11 pour les sous-trames des boisements d'altitude ;
- 9 pour les sous-trames de landes prédominantes et pelouses prédominantes ;
- 8 pour les sous-trames des milieux rocheux et prairies naturelles ou semi-naturelles.

L'intégration de la pollution lumineuse dans les critères de note a conduit à l'élimination de plusieurs réservoirs potentiels déjà faibles sur les autres critères (Figure 18). Cette méthode a également été appliquée à la définition des corridors écologiques en comparant la cartographie obtenue par une modélisation n'intégrant pas la pollution lumineuse, à celle intégrant ce paramètre (Figure 19). Les corridors écologiques nocturnes sont ceux conservés ou déviés par la pollution nocturne selon son intensité.

Ce travail a permis de visualiser les points de conflits (en rouge sur les cartes) vis-à-vis de la pollution lumineuse et d'identifier les réservoirs de biodiversité et les corridors peu ou pas impactés par la pollution lumineuse, qui constituent la Trame noire. Le Parc national, en lien avec les syndicats départementaux d'énergie, envisage de travailler avec les communes concernées en les accompagnant dans la modification de leurs pratiques ou de leurs équipements d'éclairage dans les zones identifiées. L'objectif sera de restaurer les réservoirs et les corridors écartés à cause de la pollution lumineuse.

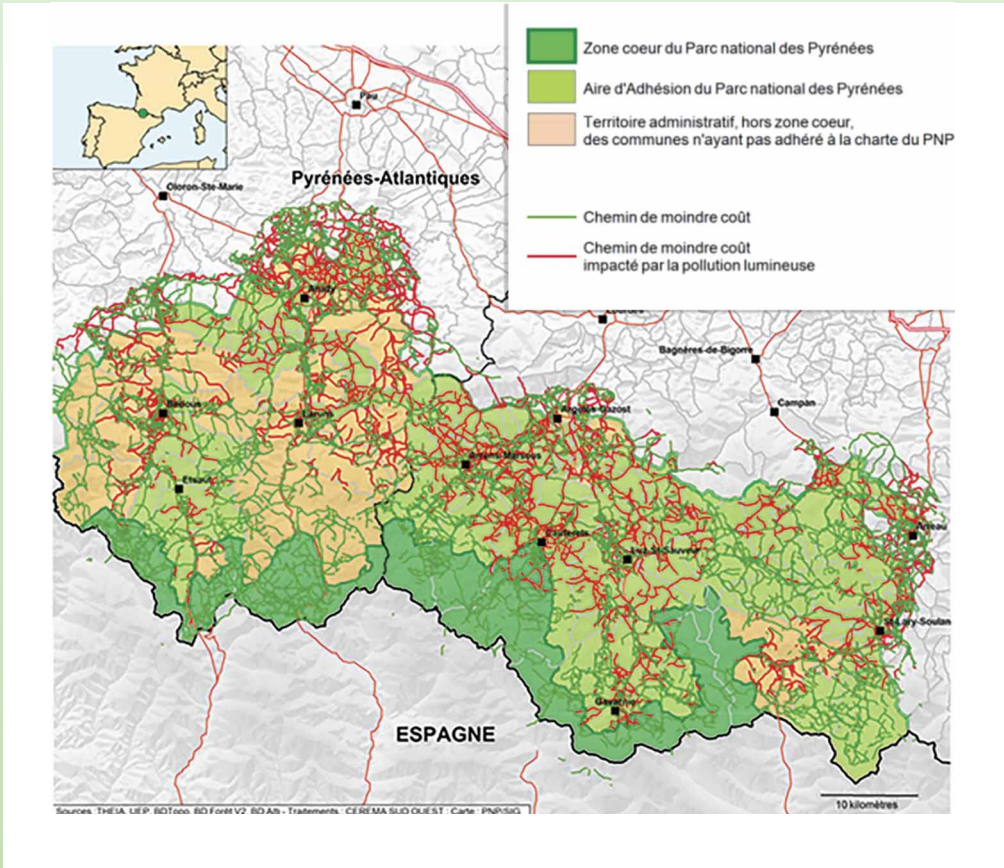
Une étude est en cours avec le Centre permanent d'initiatives pour l'environnement (CPIE) des Hautes-Pyrénées et le Conservatoire d'espaces naturels d'Occitanie à travers 260 points d'enregistrement de l'activité des chauves-souris durant deux ans sur tout le territoire. L'objectif est d'affiner le seuil de sensibilité des chauves-souris sur la pollution lumineuse avec une méthode plus robuste [55].

Figure 18



Réservoirs de biodiversité impactés et non impactés par la pollution lumineuse. Source : PN Pyrénées.

Figure 19



Corridors écologiques impactés et non impactés par la pollution lumineuse. Source : PN Pyrénées.



4 – Cartographier la pollution lumineuse

Idéalement, la cartographie de pollution lumineuse doit prendre en compte les différentes formes de pollution lumineuse pour la biodiversité (lumière directe, projetée, diffuse, etc.), considérer à la fois la quantité, la qualité (composition*) et la temporalité de la lumière (horaires d'éclairage) ainsi que tout facteur influençant le niveau de pollution (topographie, conditions météorologiques).

Principales grandeurs de l'éclairage

En éclairagisme on distingue principalement 4 grandeurs liées à la quantité de lumière (Figure 20) :

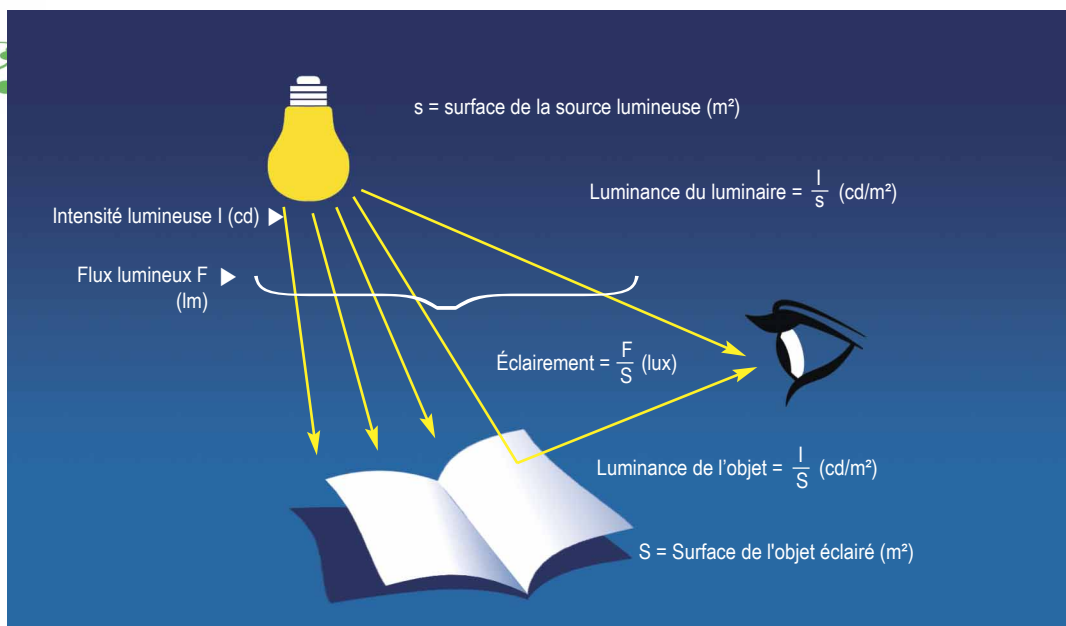
■ **intensité lumineuse*** : concentration de lumière émise dans une direction donnée (« rayon lumineux ») en une seconde. L'intensité lumineuse est exprimée en candela (cd) et se mesure généralement en laboratoire à l'aide d'un goniophotomètre. L'intensité lumineuse est directement liée à la sensibilité spectrale de l'œil associant une quantité de lumière dans un angle solide précis ;

■ **flux lumineux*** : quantité de lumière émise par une source lumineuse dans toutes les directions en une seconde (c'est donc la somme des intensités lumineuses). Le flux lumineux est exprimé en Lumen (lm). Contrairement à l'intensité lumineuse, le flux lumineux n'est pas perceptible par l'œil. Le flux lumineux total d'un luminaire est une grandeur déclarée par un fabricant de source lumineuse, dans des conditions définies et n'est pas mesurable *in situ* ;

■ **luminance*** : intensité lumineuse rapportée à une surface apparente qui émet ou réfléchit la lumière. La luminance est exprimée en cd/m^2 et se mesure à l'aide d'un Luminance-mètre. La luminance caractérise relativement bien la perception de luminosité d'un observateur (ressenti par l'œil) et donc l'éblouissement et le contraste. Plus l'intensité sera forte et la surface de réflexion ou émettrice faible, plus le risque d'éblouissement sera important ;

■ **éclairement*** : flux lumineux rapporté à l'aire d'une surface, généralement celle qui reçoit la lumière. L'éclairement est exprimé en lux (équivalent à des lm/m^2) et se mesure à l'aide d'un Luxmètre.

Figure 20



Principales grandeurs de l'éclairage.

* les termes en gras suivis d'un astérisque sont définis dans le glossaire en page 102.

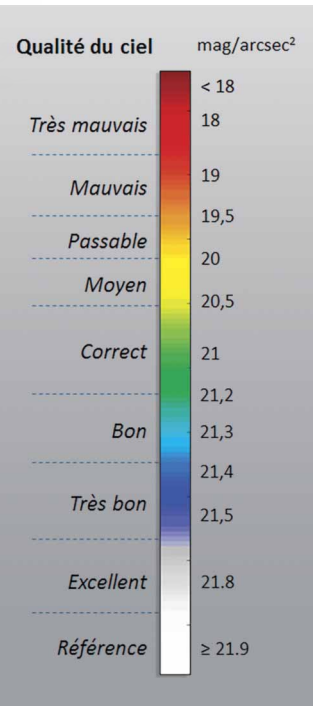
Aussi, l'arrêté ministériel du 27 décembre 2018 (Partie C) introduit une nouvelle grandeur appelée **la densité surfacique de flux*** (en lm/m^2) qui peut être considérée comme une dotation maximale de flux lumineux pour éclairer une surface donnée et atteindre ainsi une performance en éclairage.

Enfin, on peut aussi évoquer les notions suivantes :

■ **radiance*** : sur les images satellites ou les photographies aériennes, on emploie comme grandeur la radiance (luminance énergétique) qui correspond à la quantité de lumière rayonnant d'une surface donnée et perçue par le capteur photographique utilisé dans la prise de vue. Il s'agit donc de la valeur pour chaque pixel de l'image satellite ou aérienne. La radiance est exprimée en $\text{nanoWatt}/\text{cm}^2/\text{sr}$;

■ **noirceur du ciel nocturne*** (*Night Sky Brightness*) : utilisée en particulier dans le domaine de l'astronomie, cette grandeur traduit le niveau de visibilité du ciel étoilé (luminance du ciel nocturne). Elle est exprimée en magnitude par arc seconde au carré ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$), en se référant à l'Échelle de Bortle (Figure 21) et se mesure à l'aide d'un photomètre. L'appareil le plus utilisé est le boîtier dit « SQM » (*Sky Quality Meter*).

Figure 21



© DarkSkylab.

Adaptation d'après l'échelle de Bortle.

Enfin, indépendamment de la quantité de lumière, d'autres paramètres sont importants et en particulier la **composition spectrale de la lumière***. Il s'agit de la proportion des différentes longueurs d'onde dans la lumière émise. Une source lumineuse dont les longueurs d'ondes sont réparties sur l'ensemble du spectre visible pour l'Homme donnera une lumière blanche et, *a contrario*, colorée si les longueurs d'ondes sont localisées ou si certaines longueurs d'onde sont manquantes. Cette composition spectrale peut se mesurer à l'aide d'un spectromètre. On peut aussi qualifier une lumière par sa **température de couleur*** (exprimée en Kelvin) qui traduit la proportion de bleu et de rouge dans le spectre lumineux. Plus la lumière est chaude (forte proportion de rouge) plus la température de couleur est basse et inversement.

Sources de données

Plusieurs sources de données sont exploitables pour appréhender le phénomène de pollution lumineuse :

- données de recensements des points lumineux publics mises à disposition par la commune ou le gestionnaire de l'éclairage public (ex. : Syndicat d'éclairage, etc.) ;
- mesures au sol des différentes grandeurs de l'éclairage ;
- données de radiance issues d'images aériennes de nuit ;
- données de radiance issues d'images satellites.

Ces différentes sources de données présentent chacune des avantages et des inconvénients et sont à rapporter à l'échelle considérée.

■ **Données du parc d'éclairage public**

À ce jour, les collectivités n'ont pas obligation de constituer une base de données « éclairage public ». Par contre, si une telle base de données est constituée, la publication en ligne et en libre-accès de ces données publiques est une obligation pour les communes de plus de 3 500 habitants⁵.

Au-delà de la localisation de chaque point lumineux, ces bases de données peuvent aussi contenir des caractéristiques telles que :

- le type de source (SHP, LED, ...);
- la température de couleur;
- le flux total émis par le luminaire/la source lumineuse;
- la puissance consommée;
- la proportion de flux émis vers le haut;
- la hauteur du mât.

Ces informations sont souvent disponibles pour le parc récent (principalement des LED), soit directement dans la base de données communale (si elle existe), soit dans les fiches techniques des luminaires, fournies par les constructeurs. Pour le parc ancien, des estimations plus ou moins précises peuvent être faites : la température de couleur peut se déduire du type de source lumineuse et un ordre de grandeur du flux peut se déduire aussi du type et de la puissance de la source lumineuse.



Données lampadaires géolocalisées de la Ville de Paris, chaque lampadaire dispose d'une fiche d'identité regroupant les caractéristiques techniques correspondantes – Extrait sur le Bois de Vincennes. Source : Ville de Paris <https://opendata.paris.fr/page/lalicence/>

Accès aux données

L'arrêté ministériel du 27 décembre 2018 (Partie C) demande au gestionnaire d'éclairage de tenir à la disposition des agents réalisant les contrôles de conformité de l'arrêté les données techniques suivantes concernant les installations lumineuses dont il a la charge :

- la proportion (en %) de lumière émise par le luminaire au-dessus de l'horizontale ;
- la proportion (en %) de lumière émise par le luminaire dans un cône de demi-angle 75,5°, par rapport à la lumière émise sous l'horizontale ;
- la température de couleur nominale de la lumière émise par la source ;
- la puissance électrique (en watts) du luminaire en fonctionnement au régime maximal ;
- le flux lumineux nominal de la source en fonctionnement au régime maximal ;
- la date d'installation de la tête du luminaire.

5 - La loi du 8 octobre 2016 pour une République numérique oblige les collectivités de plus de 3 500 habitants et 50 agents à publier les bases de données – lorsqu'elles sont disponibles sous forme électronique - de façon gratuite, accessible, ouverte et permettant la réutilisation des données.

■ Mesures au sol des différentes grandeurs de l'éclairage

Pour des échelles locales, par exemple sur une commune ou une intercommunalité, il peut être envisageable d'effectuer des mesures manuelles au sol des différentes grandeurs d'éclairage en qualité et en quantité. Cela peut se justifier pour pallier l'absence de données spatialisées, vérifier leur fiabilité ou calibrer des modèles mais demande un investissement en moyens humains conséquent. Des démarches participatives mobilisant les citoyens peuvent être envisagées.

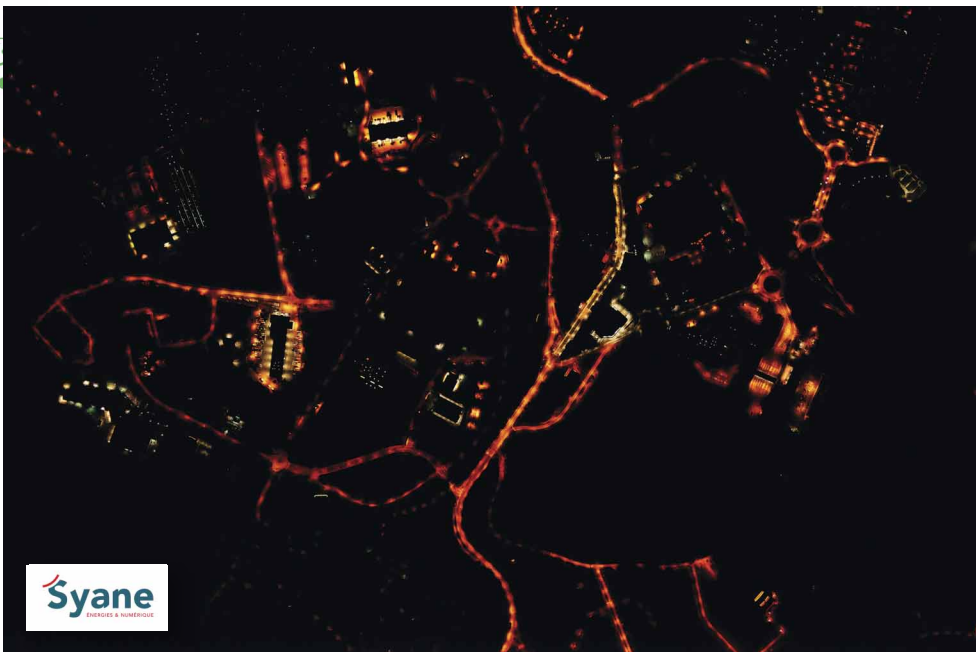
■ Images aériennes

Les lumières nocturnes peuvent être photographiées par survol aérien ou par drone. Ces images de nuit peuvent ensuite être exploitées en géomatique pour cartographier les niveaux de pollution lumineuse. Les photos aériennes de nuit présentent néanmoins l'inconvénient de ne montrer que les lumières perçues par le haut selon un angle de quasiment 90° par rapport au sol (lumières zénithales, directes ou réfléchies par les surfaces éclairées). Elles ne représentent donc pas l'ensemble de la lumière artificielle nocturne à laquelle la biodiversité est exposée, en particulier celle perçue par la faune au sol, en vol à des hauteurs proches de celles des mâts d'éclairage ou dans l'eau. Néanmoins, elles permettent de visualiser directement les flux émis vers le haut issus de tout éclairage public comme privé.

Quelques métropoles disposent déjà de telles photos. Par exemple, en 2013, Nantes métropole a fait réaliser une photo aérienne de nuit par l'IGN, en deux temps nocturnes (heures de fonctionnement normal et réduit de l'éclairage public). En novembre 2017, le Syane (Syndicat des énergies et de l'aménagement numérique de la Haute-Savoie) a aussi fait réaliser une orthophoto nocturne d'une partie du périmètre de l'agglomération d'Annecy, dans le cadre du projet Territoire à énergie positive pour la croissance verte « Stratégie lumière du Grand Annecy »⁶. Cette prestation a également été réalisée en deux temps (premier passage entre 20h et 23h et second passage entre minuit et 01h58). D'autres initiatives existent en France (ouest parisien, Amiens, la Réunion, etc.). En Suisse, Genève dispose également d'une orthophotographie nocturne.

Ce type de recensement reste assez onéreux, de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers d'euros selon le territoire couvert. À titre d'exemple, la prestation menée sur Nantes métropole a coûté environ 70 000 € HT (2013) pour un territoire de 523,36 km². Celle menée à Annecy a coûté environ 100 000 € HT (2017) pour une surface de 235 km², comprenant 82 000 € pour le survol avec rendus de l'image brute (présentant des difficultés supplémentaires liées au contexte montagneux pour le vol aérien) et 22 000 € pour le traitement et l'analyse des images avec une détermination du niveau de nuisance lumineuse par pixel. Il s'agit de démarches expérimentales, le coût de ces images aériennes nocturnes sera peut-être amené à baisser dans les années à venir si ces prises de vues se multiplient.

8



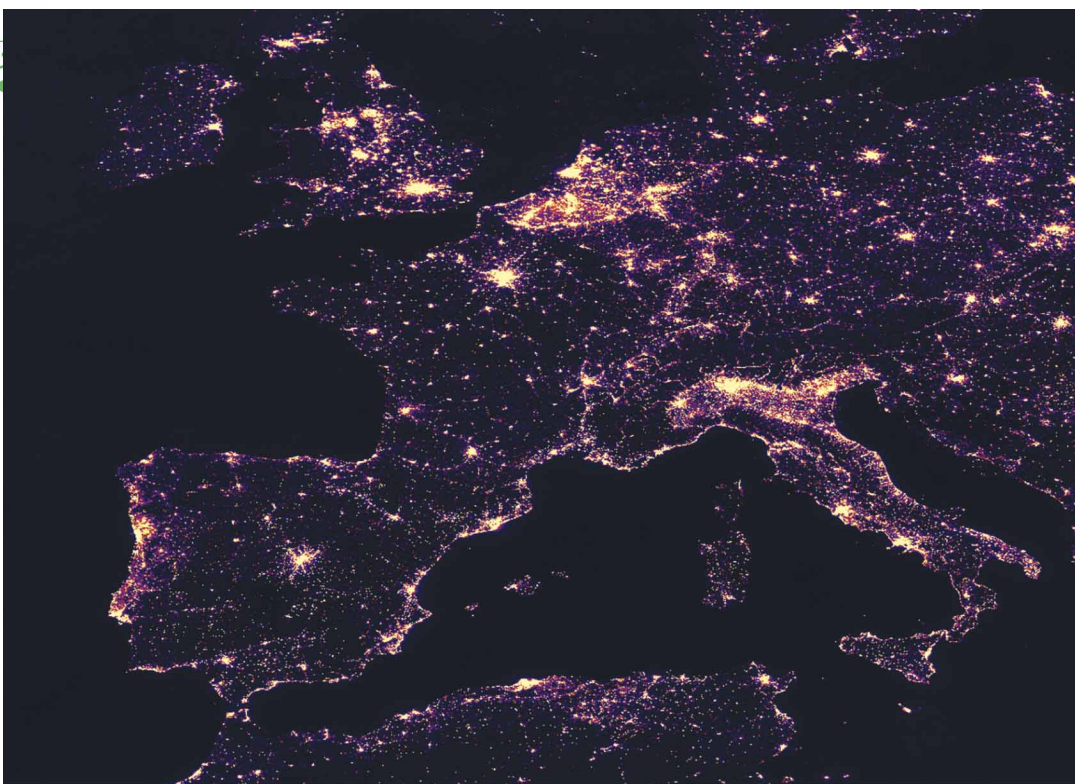
Extrait de photographie aérienne du Grand Annecy, Territoire à énergie positive pour la croissance verte.
Source : Syane & Grand Annecy.

■ Images satellites

La capture d'images satellites de nuit existe depuis déjà plusieurs décennies. Ces images constituent une source d'information pouvant alimenter des projets de Trame noire même si elles présentent des limites. En effet, comme pour les photos aériennes, les satellites ne captent que la lumière perçue par le haut et donc ne restituent qu'une partie de la pollution lumineuse à laquelle est exposée la biodiversité. D'autre part, en fonction des satellites, seules certaines plages de longueurs d'onde seront captées. Les périodes de l'année et les heures de captation sont également déterminantes (par exemple en fonction de la pratique ou non d'une coupure de l'éclairage public en cœur de nuit). Enfin, en fonction de la résolution des images, les données satellites seront plus ou moins pertinentes pour des exploitations à l'échelle locale. Néanmoins, le secteur de l'imagerie satellitaire nocturne est en pleine transformation ces dernières années avec de nouveaux satellites qui ouvrent des perspectives de plus en plus intéressantes. L'essor des nanosatellites devraient ainsi permettre d'avoir à disposition de plus en plus de données disponibles et pertinentes, même si dans le même temps la multiplication des satellites constitue une menace pour l'observation du ciel étoilé.

Les principaux satellites qui effectuent des prises de vue nocturnes depuis plusieurs décennies sont ceux de la Nasa (le satellite DMSP-OLS en fonction de 1992 à 2013 et les satellites SuomiNPP et JPSS1 en fonction depuis 2011). Les données sont disponibles sur le site du NOAA⁷. Les satellites SuomiNPP et JPSS1 - qui embarquent le capteur VIIRS - offrent une résolution de 740 mètres par pixel ce qui permet surtout d'envisager des exploitations à des échelles larges, par exemple nationale, continentale ou mondiale. Pour des échelles locales, ces données deviennent peu exploitables. En outre, ces satellites captent peu ou pas du tout les courtes longueurs d'onde (bleus, ultraviolets), ce qui présente un réel inconvénient dans le cadre de la conversion de l'éclairage extérieur vers les LED (dont la lumière blanche est susceptible d'être riche en bleu).

9



Vue satellite de nuit de l'ouest de l'Europe. Source : NOAA's National Geophysical Data Center (données et image) & La TeleScop (acquisition et production).

Deux satellites israéliens de la famille *Earth Resources Observation Satellite* (EROS) - EROS A et EROS B⁸ - sont opérationnels depuis 2013. EROS B offre une résolution de 0,7 mètre par pixel ce qui permet d'envisager des exploitations très fines [56]. En revanche, le coût d'achat des images reste assez élevé et elles ne fournissent pas directement d'information sur la radiance (satellite « panchromatique » c'est-à-dire que seules des images en noir et blanc peuvent être obtenues) ce qui en limite l'intérêt.

7 - <http://bit.ly/3dn96Ep>

8 - <http://bit.ly/3bdg3Xc>

En 2015, la société chinoise CGSatellite a lancé la constellation Jilin 1 permettant de faire des acquisitions à 0,92 mètre par pixel, sur les 3 bandes spectrales rouge, vert, bleu. Le coût est de 24 €/km² (avec un minimum de 100 km²). Comme Jilin fait une acquisition sur ces 3 bandes spectrales, il est possible d'identifier des sources lumineuses de couleurs et de calculer la radiance pour chacune d'entre elles. Une opération sur ces plages de longueurs d'ondes permet en effet de produire la radiance.

10

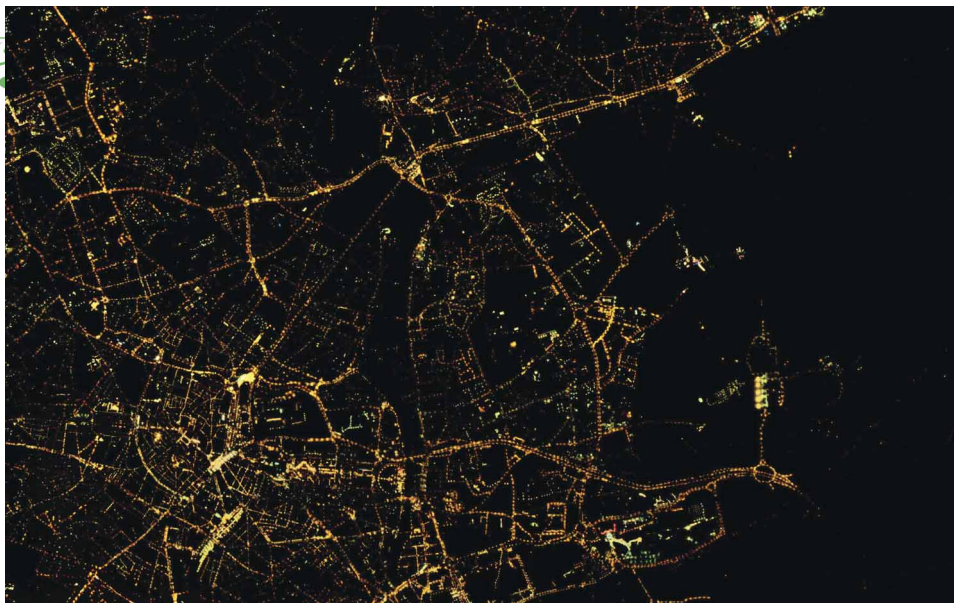
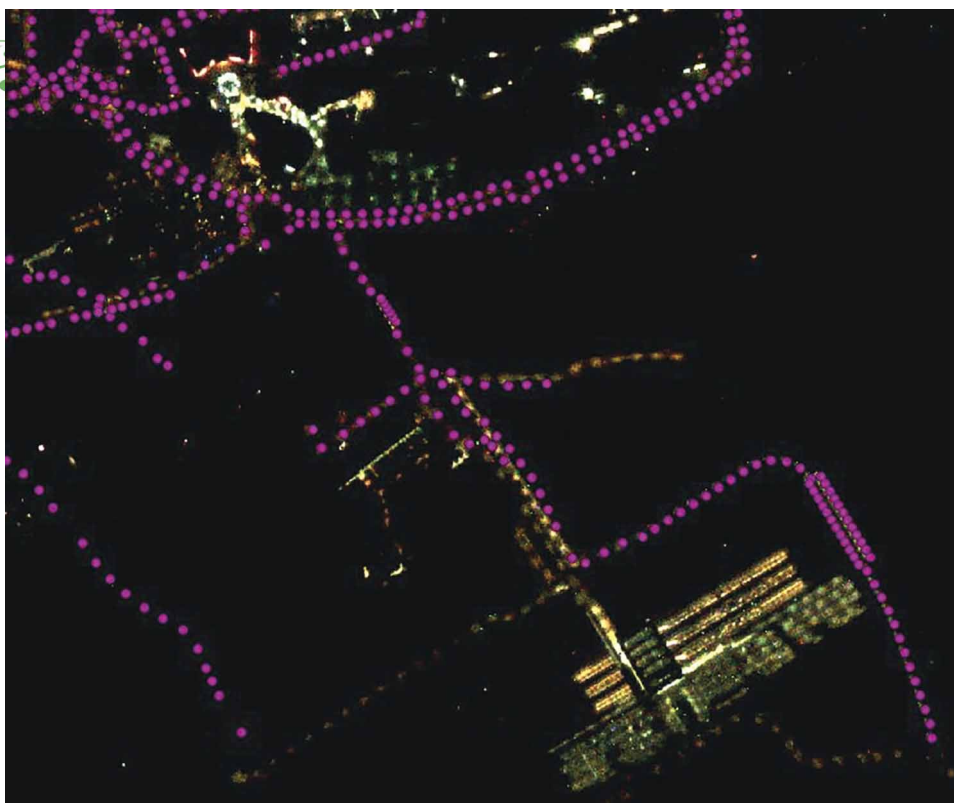
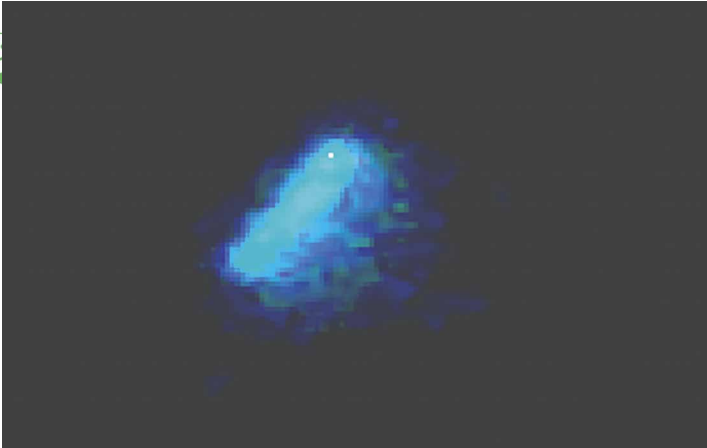


Photo satellite de Montpellier, 26 août 2020. Source : Jilin-1 CGSatellite, La TeleScop.

11



Intégration de l'éclairage public et la radiance acquise par le satellite Jilin sur le Jardin d'acclimatation à Paris, 31 décembre 2019. Source : Jilin-1 CGSatellite - La TeleScop.



© CGSatellite - La TeleScop

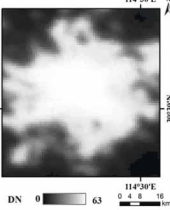
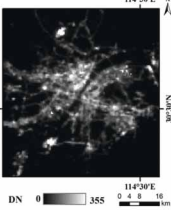
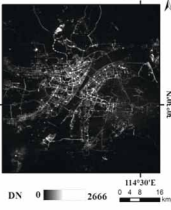


Enseigne publicitaire bleue se reflétant sur la tôle blanche du bâtiment. Source : CGSatellite - La TeleScop.

En 2018, l'université de Wuhan a lancé un prototype permettant de faire des acquisitions à 130 m de résolution sur la bande 460-800 nm. Le satellite Luojia 1.01 est ainsi le précurseur d'une future constellation de 60-80 nanosatellites dont la résolution serait autour de 100 m (source : Nasa). Les données 2018 de Luojia sont disponibles gratuitement sur le site de l'université de Wuhan⁹ mais présentent pour le moment peu d'intérêt pour suivre des évolutions sur le terrain.

Le tableau suivant compare les caractéristiques de ces principales images satellites disponibles.

Tableau 2. Analyse comparative entre les images obtenues par les satellites DMSP, VIIRS, Luojia et Jilin. Sources : d'après [57,58]

Image comparative				Non disponible
Satellite	DMSP-OLS	VIIRS	LUOJIA 0.1	JILIN
Période disponible	1992-2013	Novembre 2011 à aujourd'hui	Juin 2018 à aujourd'hui	Depuis 2015, mais les acquisitions se faisant sur commande, elles restent rares en France jusqu'à aujourd'hui.
Pays d'origine du satellite	États-Unis	États-Unis	Chine	Chine
Résolution spatiale	2,7 km	740 m	130 m	0,92 m
Bande spectrale	500-900 nm	500-900 nm	460-800 nm	430-730 nm

9 - Université de Wuhan : <http://bit.ly/2ZlBRJf>

■ Analyse comparative des différentes sources d'information

Le tableau suivant propose une comparaison des différentes sources de données d'éclairage (d'après Sordello, 2018 [59]) :

Tableau 3. Comparaison des différentes sources d'information

Types de données	Principe	Échelle	Avantages	Inconvénients
Données des parcs d'éclairage publics	Données digitalisées mises à disposition par les communes ou le syndicat d'énergie associé	Locale (commune, intercommunalité)	Permet de bien représenter la morphologie d'un parc d'éclairage et les contributions de ses composantes à l'échelle du point lumineux individuel	Concerne uniquement l'éclairage public Disponibilité des données variable Données souvent hétérogènes (pas de standard national) Difficultés de mise à jour par les collectivités
Mesures au sol	À effectuer soi-même par des appareils de mesure (Luxmètre, spectromètre, SQM...)	Locale (commune, intercommunalité)	Très précis, possibilité d'effectuer ces relevés sur les sources d'éclairage aussi bien publiques que privées (selon accès).	Consommateur de ressources (temps de travail)
Images aériennes de nuit	Images nocturnes prises par vol d'avion ou de drone	Locale (commune, intercommunalité)	Restitue toutes les sources de lumière privées comme publiques avec une bonne résolution géographique (de l'ordre de 1 m)	Lumière perçue par le haut uniquement Coût potentiellement élevé
Images satellites	Images captées par les satellites (principalement de la Nasa, l'ISS, Luojia 1.01...)	Nationale voire continentale/mondiale Locale pour les satellites affichant des résolutions fines	Restitue toutes les sources de lumière privées comme publiques	Limites dans la composition de la lumière en fonction des capteurs utilisés Dimension temporelle difficile à prendre en compte (horaires de prise de vue, météo, ...)

Modéliser la pollution lumineuse

Les données présentées jusqu'ici permettent de localiser et caractériser les sources d'émission de lumière artificielle voire de mesurer la lumière émise dans l'environnement. À partir de ces données brutes, il est nécessaire ensuite de modéliser la pollution lumineuse. Le passage entre données brutes d'éclairage et pollution lumineuse est complexe. Il doit tenir compte par exemple de la diffusion des ondes lumineuses dans les trois dimensions de l'espace, des conditions météorologiques ou encore de la temporalité (par exemple les moments de la nuit - début, milieu ou fin - pour tenir compte des politiques d'extinction de l'éclairage public). Il existe ainsi plusieurs manières, plus ou moins directes, de cartographier la pollution lumineuse. La méthode est à déterminer avant tout en fonction de l'échelle appréhendée et des moyens techniques et financiers disponibles.

■ Les modélisations à l'aide de données proxy

La présence de pollution lumineuse est liée à la densité de population, au niveau d'urbanisation ou encore à une occupation du sol artificialisée. Ces données sont alors considérées comme des **données proxy*** permettant d'estimer le niveau de pollution lumineuse sans utiliser directement de données d'éclairage. Ces modèles sont

parfois calibrés par des mesures terrain pour arriver à une cartographie de pollution lumineuse plus fidèle à la réalité. En France, les premières modélisations de pollution lumineuse réalisées ont utilisé des données proxy, comme la densité de population (carte Licoriness) ou l'occupation du sol (carte Avex¹⁰).

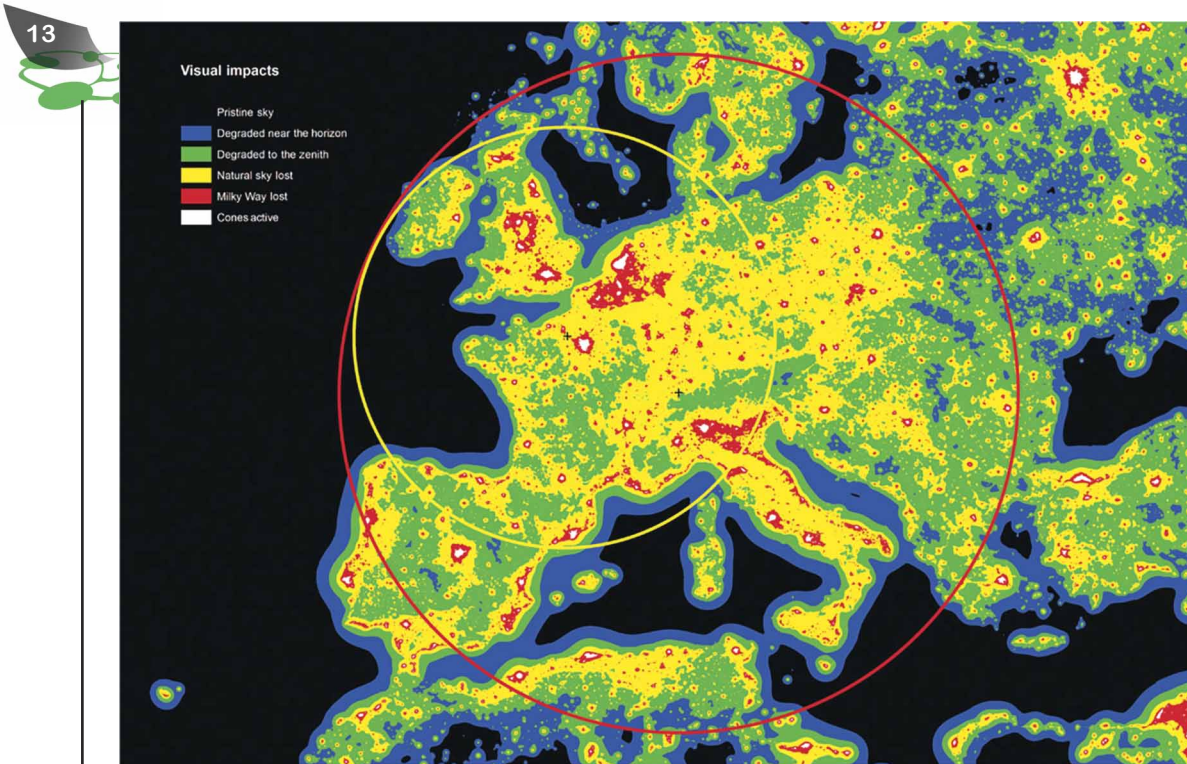
Rapides à mettre en œuvre, ces approches sont utiles pour des documents de sensibilisation par exemple. Pour l'élaboration d'une Trame noire, il paraît nécessaire de nuancer/compléter ces premières approches à partir de données d'éclairage pour tenir compte des spécificités du territoire (densité plus ou moins importante de points lumineux, technologies d'éclairage utilisées, puissances et caractéristiques des installations, etc.). En effet, les données proxy sont des informations qui peuvent ne pas refléter la réalité, en surestimant certains secteurs (par exemple en cas d'extinction ou baisse de luminosité au cours de la nuit) ou en sous-estimant d'autres secteurs (par exemple des zones peu urbanisées/habitées qui sont pourtant sur-éclairées).

■ Atlas de la pollution lumineuse

Il existe à l'échelle mondiale un atlas de la pollution lumineuse publié en 2016 (mettant à jour un premier atlas publié en 2001) qui modélise la qualité du ciel nocturne. Cet atlas a été principalement élaboré à partir des données de 2015 issues des satellites de la Nasa (VIIRS) et complétées de mesures de terrain (programme mondial de sciences participatives) [2]. L'atlas est disponible sur le site www.lightpollutionmap.info qui contient aussi les données de radiance brute pour chaque année depuis 2012. Une seconde plateforme permet de produire des tendances d'évolution des données de radiance depuis 2012 pour un territoire donné :

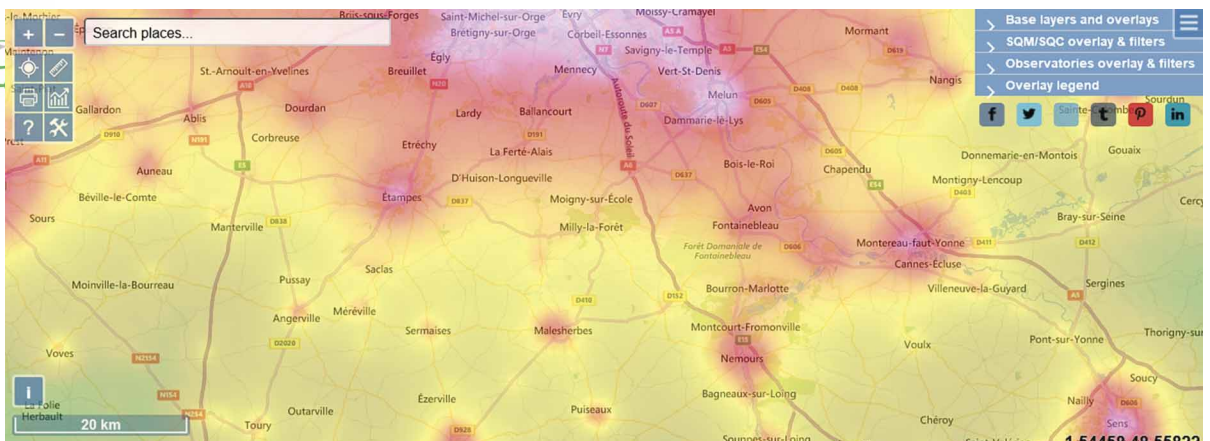
<https://lighttrends.lightpollutionmap.info>

Ces sources de données sont précieuses et peuvent permettre de situer globalement un territoire, même local (parc naturel régional par exemple), dans le contexte national/interrégional. En revanche, elles ne sont pas suffisamment précises, ni traitées, pour constituer la base d'un projet de Trame noire à l'échelle locale (commune/intercommunalité). Pour cela, il est nécessaire de se tourner vers d'autres méthodes de modélisation.



Atlas de la pollution lumineuse, vue sur l'Europe de l'ouest. Falchi et al., 2016 [2].

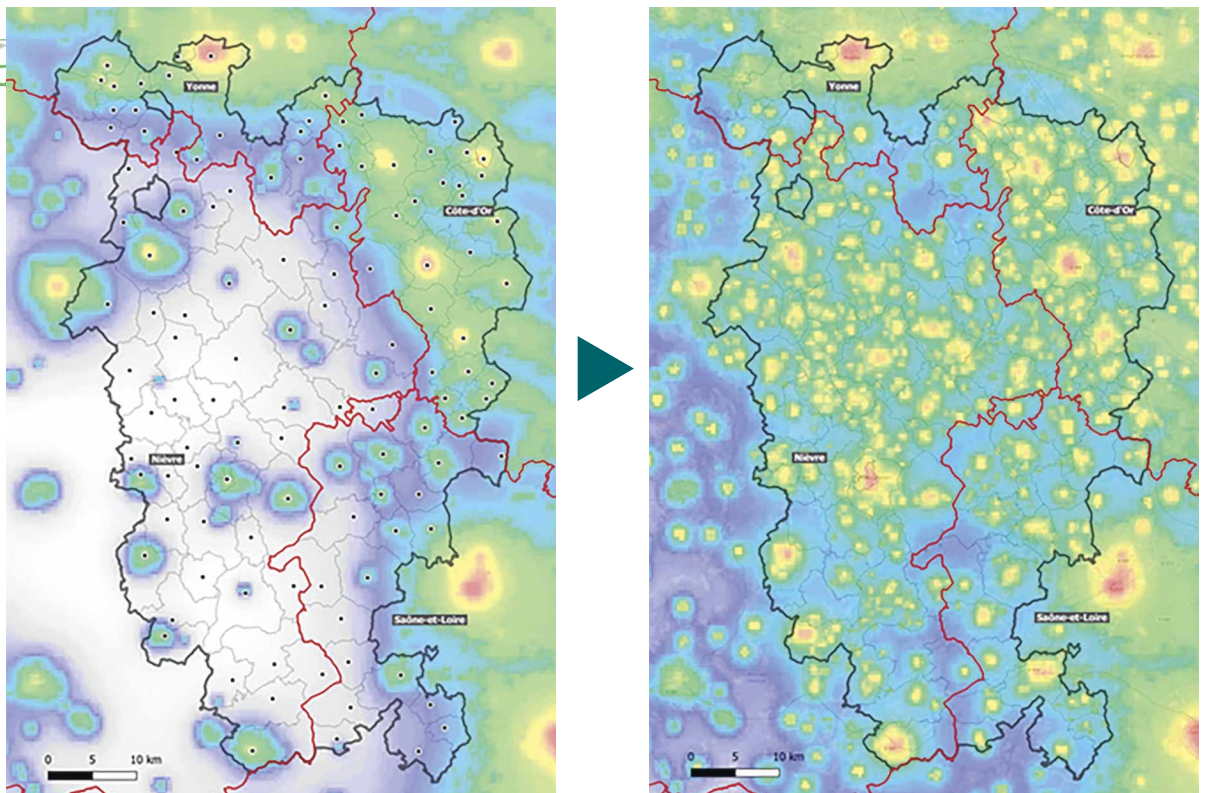
10 - <https://www.avex-asso.org/>



Atlas de la pollution lumineuse sur le territoire du Parc naturel régional du Gâtinais français en Île-de-France, le halo de l'agglomération parisienne est nettement visible. Source : www.lightpollutionmap.info

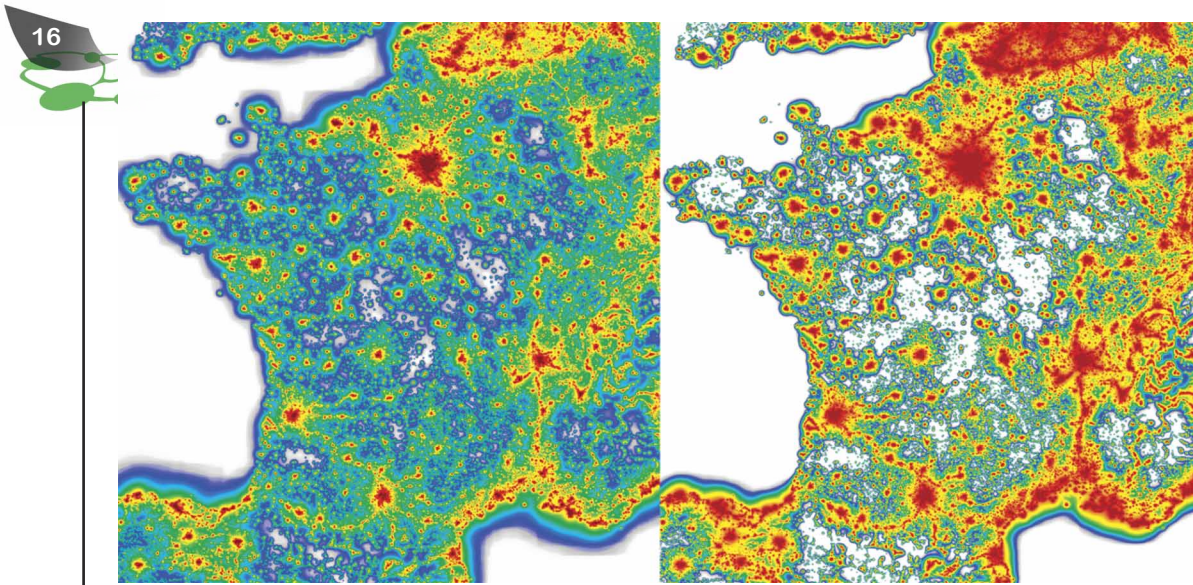
■ Modélisation de la pollution lumineuse à l'échelle locale

Pour pallier les différents problèmes liés à la modélisation ou aux biais présents dans les différents jeux de données, des modèles sont en cours de développement. C'est le cas du logiciel Otus développé par DarkSkyLab qui est capable d'intégrer différents jeux de données de sources et de calibration. Ce logiciel permet par exemple de produire une carte de pollution lumineuse d'un territoire en extrémités de nuit en injectant dans le modèle les contributions des communes pratiquant l'extinction, communes non visibles dans les données satellites généralement collectées en seconde partie de nuit. Il s'agit dans ce cas du mode mixte de simulation qui génère une carte en intégrant, d'une part, les données satellites et, d'autre part, les données issues de la collecte de données géoréférencées (parcs d'éclairage public).



Cartes de la pollution lumineuse après extinction en cœur de nuit (uniquement avec les données VIIRS, à gauche) et avant extinction en extrémités de nuit (données VIIRS et données SIG des parcs d'éclairage public, à droite) sur le PNR du Morvan. Source : DarkSkyLab.

Grâce au développement en parallèle d'instruments de mesure de la brillance du ciel nocturne et la capacité d'Otus à intégrer ces données, il est désormais possible de produire des cartes de pollution lumineuse par conditions de ciel couvert. La couverture nuageuse réduit la pollution lumineuse dans les zones déjà peu exposées mais l'accroît dans les zones les plus exposées en amplifiant le halo lumineux de la ville.



*Effet de la couverture nuageuse sur la carte de pollution lumineuse (à partir de données VIIRS).
Source : DarkSkyLab.*

Il est donc désormais possible de générer les cartes de pollution lumineuse d'un territoire donné à partir de n'importe quel type de sources disponible (imagerie aérienne ou satellite, base de données techniques, occupation des sols...) sous différentes conditions extérieures (météo, horaire) à partir du même logiciel et de confronter le résultat à des données de calibration mesurées sur le terrain.



5 - Espèces modèles

Une fois l'information brute collectée sur l'éclairage nocturne existant, il est nécessaire d'estimer les « niveaux » de pollution lumineuse au regard des espèces présentes sur le territoire. La pollution lumineuse a des effets sur tous les groupes biologiques, il serait donc en théorie nécessaire d'identifier une Trame noire pour chaque espèce présente. Ceci n'étant techniquement pas envisageable, il est donc préconisé d'appliquer la méthode des sous-trames - déjà employée pour la Trame verte et bleue - afin de prendre en compte les cortèges d'espèces associés aux différents grands types de milieux. Pour chaque sous-trame une ou plusieurs espèces « modèles » seront sélectionnées.

17



© Romain Sordello

Chouettes hulottes (Strix aluco).

Sous-trames et espèces modèles

Les sous-trames correspondent aux grands types de milieux naturels :

- ouverts ;
- boisés ;
- humides ;
- aquatiques ;
- littoraux le cas échéant.

Données de biodiversité nocturne : où les trouver ?

Le Système d'information de l'inventaire du patrimoine naturel (SINP)

En France, les données d'observation sur les espèces (inventaires, suivis, dénombrements...) sont partagées et diffusées dans le cadre du Système d'information de l'inventaire du patrimoine naturel (SINP). Le SINP réunit ainsi le réseau d'acteurs mettant en partage l'information naturaliste qu'ils détiennent selon un ensemble de méthodes et de règles communes, afin de structurer les connaissances sur la biodiversité (espèces et habitats) sur le territoire national et de les mettre à disposition du plus grand nombre selon la réglementation en vigueur. L'animation au niveau régional est confiée aux Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (Dreal) en métropole ou, dans les outre-mer, aux Directions chargées de la nature, en coordination avec la Région et avec l'appui des structures et réseaux de producteurs de données.

L'inventaire national du patrimoine naturel (INPN)

L'Inventaire national du patrimoine naturel est le portail de la biodiversité française. Il diffuse la connaissance sur les espèces animales et végétales, les milieux naturels, les espaces protégés et le patrimoine géologique. Ces données de référence, validées par des réseaux d'experts, sont mises à la disposition de tous, professionnels, amateurs et citoyens. Restituées de manière standardisée, elles peuvent ainsi alimenter toute démarche de planification écologique, et notamment la TVB et la Trame noire. Les informations mises à disposition sont issues de nombreux programmes nationaux et de données fournies par un ensemble de partenaires (administrations et opérateurs de l'État, associations, bureaux d'études, etc.). L'UMS PatriNat organise leur consolidation, leur validation et leur diffusion notamment à travers le site internet de l'INPN (<https://inpn.mnhn.fr>) et le portail OpenObs (<https://openobs.mnhn.fr>). Ce dernier permet de visualiser, d'explorer et de télécharger les données d'observation sur les espèces disponibles dans l'Inventaire national du patrimoine naturel, plateforme nationale du SINP.

Quelles espèces sur ma commune ?

L'INPN offre la possibilité de rechercher les espaces et les espèces recensés sur une commune ou un département. Il suffit pour cela de saisir le nom du territoire recherché dans le formulaire « Rechercher près de chez vous... » sur la page d'accueil.

OpenObs permet par ailleurs la recherche des données d'observation sur les espèces disponibles dans l'INPN, de les visualiser sous la forme de carte ou de liste et de télécharger les données ainsi que les listes d'espèces.

De plus, chaque région met en place son propre système de diffusion (plateforme régionale du SINP) et donne également accès aux données du SINP. Pour connaître les portails régionaux ou les structures à contacter pour accéder aux données du SINP au niveau régional, rendez-vous sur le site de la Dreal de la région concernée¹¹.

Comment viser prioritairement les espèces nocturnes ?

À ce jour, il n'existe pas d'entrée explicite via l'INPN ou autre outil associé (plateforme OpenObs par exemple) permettant d'accéder de manière simple à l'ensemble des données d'observation d'espèces sur la base d'un critère « nocturne », mais cette option pourrait être envisagée à l'avenir. Il sera alors possible ensuite de faire évoluer OpenObs pour améliorer les modules de recherche afin de proposer de tels critères. Pour le moment, une approche taxonomique (classe, ordre ou famille) dans la recherche de données peut néanmoins permettre de viser certaines espèces nocturnes en ciblant certains groupes biologiques (chauves-souris, rapaces nocturnes, amphibiens).

11 - Exemple pour l'Île-de-France : <https://bit.ly/36nrmtQ>
 Exemple pour Auvergne-Rhône-Alpes : <https://bit.ly/3imDttz>

Critères de sélection des espèces

Comme dit précédemment, on considère qu'environ 30 % des vertébrés et 65 % des invertébrés sont en tout ou partie nocturnes [40]. Par ailleurs, les preuves d'impacts de l'éclairage artificiel sont désormais existantes pour de nombreux groupes et sous-groupes biologiques : papillons de nuit [60], invertébrés aquatiques [61], lucioles et vers luisants [62], reptiles [63], amphibiens [64], oiseaux [65], chauves-souris [66], mammifères terrestres [67], poissons [68], végétaux [69], etc. Dans le même temps il est compliqué de considérer que toutes ces espèces peuvent être indicatrices d'une bonne qualité de la nuit pour identifier une Trame noire. En effet, la lumière artificielle est une pression parmi d'autres, qui s'ajoute aux menaces déjà exercées par les activités humaines (artificialisation des sols, dégradation des habitats naturels, pesticides, bruit...). Pour considérer qu'une espèce est pertinente pour caractériser la bonne qualité de l'environnement nocturne, il est donc important de pouvoir hiérarchiser les facteurs de pression. Ce type d'évaluation a été mené sur les chauves-souris [33]. Cette étude a comparé l'effet de trois facteurs (lumière artificielle, imperméabilisation des sols, agriculture intensive) sur la répartition d'espèces de chiroptères. Les résultats ont montré que la lumière conditionnait la répartition nationale des espèces étudiées. La lumière reste un facteur moins important pour déterminer la répartition de ces espèces que ne l'est l'agriculture intensive mais elle est un facteur plus important que l'imperméabilisation des sols. Elle constitue donc une menace prépondérante pour les espèces étudiées. Il a également été démontré que la pollution lumineuse avait un impact sur la connectivité des paysages chez la Pipistrelle commune, espèce pourtant traditionnellement considérée comme moins impactée par la lumière (Retour d'expérience 7). Ce type de travaux mériterait d'être reproduit sur d'autres groupes biologiques (par exemple les coléoptères Lampyridés).

18



© Fabien Paquier - OFB

Utilisation d'un capteur à ultrasons. Le profil des sons captés permet d'identifier l'espèce ou le groupe d'espèces de chiroptères.

Seuil de sensibilité

Au-delà de montrer que la lumière artificielle est une contrainte forte pour tel ou tel groupe biologique, il est nécessaire de déterminer précisément le seuil de sensibilité. Or, bien que les études sur les impacts de la lumière artificielle sur la biodiversité soient foisonnantes et que le rythme de production de la recherche sur ce sujet rejoigne celui sur le changement climatique [70], toute cette connaissance n'est pas encore synthétisée ni analysée dans une optique réellement opérationnelle. Il est donc difficile pour le moment de déterminer des seuils de sensibilité utilisables pour des modélisations de Trame noire.

Un travail approfondi de synthèse serait à mener pour objectiver et quantifier les impacts par espèces dans la perspective d'identifier des valeurs seuils pour plusieurs espèces « modèles » (à la fois par rapport à la quantité de lumière, à la composition, à la temporalité de l'éclairage, etc.). Des données chiffrées ont d'ores et déjà été centralisées pour certaines espèces concernant les niveaux d'éclairage [71]. Des travaux récents ont aussi apporté des informations sur les chauves-souris [55,72]. Mais certains groupes biologiques restent encore dépourvus ou en déficit de connaissance alors qu'ils sont potentiellement impactés par l'éclairage nocturne, à l'image des rapaces nocturnes.

Une piste peut aussi être de mobiliser les études s'intéressant au comportement de la biodiversité nocturne en contexte naturel, car celles-ci sont parfois plus abondantes. La phase de la lune influence fortement certaines espèces particulièrement sensibles à la lumière. Ces dernières stoppent leur activité lorsque les niveaux d'éclairage dus à la lune sont trop forts. Ce phénomène a été étudié chez de nombreux groupes biologiques, tels que les chauves-souris [73] et les mammifères terrestres [74], les oiseaux [75,76] ou encore les reptiles [77]. Ces résultats peuvent déjà permettre d'identifier les espèces particulièrement sensibles à la lumière nocturne, voire de déterminer des seuils de bascule.

5

Sites de référence

Il existe deux bases de données de littérature en ligne portant spécifiquement sur la lumière artificielle :

- sur le site NuitFrance : nuitfrance.fr (rubrique Bibliothèque) ;
- sur le site de l'IDA : <http://bit.ly/3riQpFW> (base Artificial light at night [ALAN] gérée par l'International Darksky Association [IDA] et le COST Loss of the Night Network [Lonne]).

6

Données relatives à la Trame noire

Comment les organiser ?

La localisation spatiale des éléments composant les trames, les réservoirs et les corridors, est une étape importante pour leur lecture et leur exploitation. À cette fin, dans le cadre de la politique TVB, un standard de données a été réalisé. Celui-ci permet d'homogénéiser les données SIG de trames produites et de faciliter ainsi le partage de ces données pour leur donner une meilleure visibilité (porter à connaissance) et simplifier la réalisation de visualisations ou d'analyses croisées (régionales, interrégionales, nationales, etc.). Ce standard peut tout à fait être utilisé pour la Trame noire dans la mesure où celle-ci va produire *in fine* également des corridors et des réservoirs par sous-trames. En outre, bien que ce standard soit pensé initialement pour l'échelle régionale, il peut tout à fait convenir pour une échelle plus locale (communes et intercommunalités, espaces naturels).

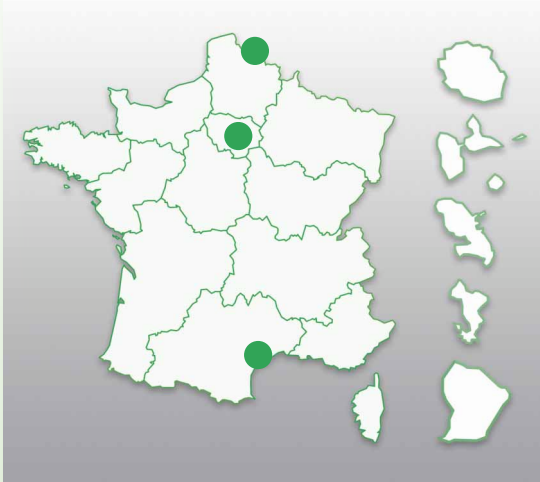
En savoir plus : <https://bit.ly/33mV5B4>

Comment partager ses données ?

Dans le cadre du Système d'information sur la biodiversité (SIB), un SI TVB a été créé. L'objectif de ce système d'information est de favoriser le recueil et le partage des données relatives aux trames (verte, bleue et désormais aussi noire). Il est donc souhaitable que les données standardisées sur la Trame noire y soient partagées. Ceci permettra d'améliorer l'accessibilité globale des données et d'envisager à terme de croiser ces données à d'autres échelles (régionales, interrégionales voire nationales) ou avec d'autres thématiques.

En savoir plus : <https://bit.ly/2Gw3wBi>

Impact de la lumière sur la Pipistrelle



Un projet de recherche a eu pour but d'étudier l'impact de l'éclairage sur les chauves-souris dans des zones fortement urbanisées [34,78]. Ce travail portait sur la Pipistrelle commune (*Pipistrellus pipistrellus*), espèce que l'on rencontre encore dans les zones très urbanisées telles que les trois villes d'étude : Paris, Lille et Montpellier. Les individus de cette espèce ont appris à profiter de l'attractivité de la lumière sur les insectes en chassant à proximité des lampadaires. La Pipistrelle commune est donc souvent considérée comme bénéficiaire de l'éclairage artificiel. Cependant, en les étudiant à l'échelle de villes, il a pu être montré qu'il y avait une relation négative entre l'abondance de pipistrelles communes et le niveau de lumière. Ainsi, même si ces chauves-souris sont capables de chasser aux alentours des sources lumineuses, lorsque l'on considère l'ensemble de leurs déplacements, elles évitent les zones les plus fortement éclairées au profit de zones sombres.

Grâce à des techniques de modélisation, les chemins les plus propices au passage des chauves-souris ont pu être estimés. Ces chemins peuvent être considérés comme des corridors écologiques qui seraient à préserver et améliorer pour que les chauves-souris puissent se déplacer et remplir leurs besoins quotidiens. La connectivité du paysage serait ainsi préservée. Par modélisation, la connectivité actuelle des trois villes d'étude pour la Pipistrelle commune a été mesurée. Ensuite, différents scénarios d'éclairage ont été testés pour observer la manière dont les changements technologiques répondant à des objectifs d'économie d'énergie pourraient affecter cette connectivité. Un des scénarios correspond à la modification de l'ensemble des éclairages, comportant de nombreuses lampes à sodium, par des LED ayant une température de couleur de 3 000 K tout en gardant le même niveau d'éclairement et le même nombre de points lumineux. Avec ce scénario, la connectivité du paysage diminue dans les trois villes testées (Figure 22). En effet, remplacer l'éclairage actuel par ce modèle de LED augmenterait significativement la quantité de lumière à longueur d'ondes bleues émises. Or, les chauves-souris sont particulièrement sensibles à ces longueurs d'ondes : un tel changement serait donc néfaste pour elles.

Figure 22



Modification de la connectivité suite à un changement de technologie d'éclairage.

© Julie Pauwels, photos de Romain Sordello

Cette étude montre donc l'importance :

- de mobiliser des solutions technologiques spécifiques pour répondre à la fois aux objectifs d'économie d'énergie et de préservation de la biodiversité (Partie C) ;
- de prendre en compte le paysage en termes de zones propices aux chauves-souris. Pour qu'une modification de l'éclairage soit effectivement favorable pour cette espèce, il est nécessaire de savoir en amont quels sont les espaces qu'elle occupe ou pourrait occuper (parcs et jardins, cours d'eau) et focaliser le travail sur ces zones et les chemins qui les relient.

Comment gérer l'éclairage artificiel dans les continuités écologiques ?



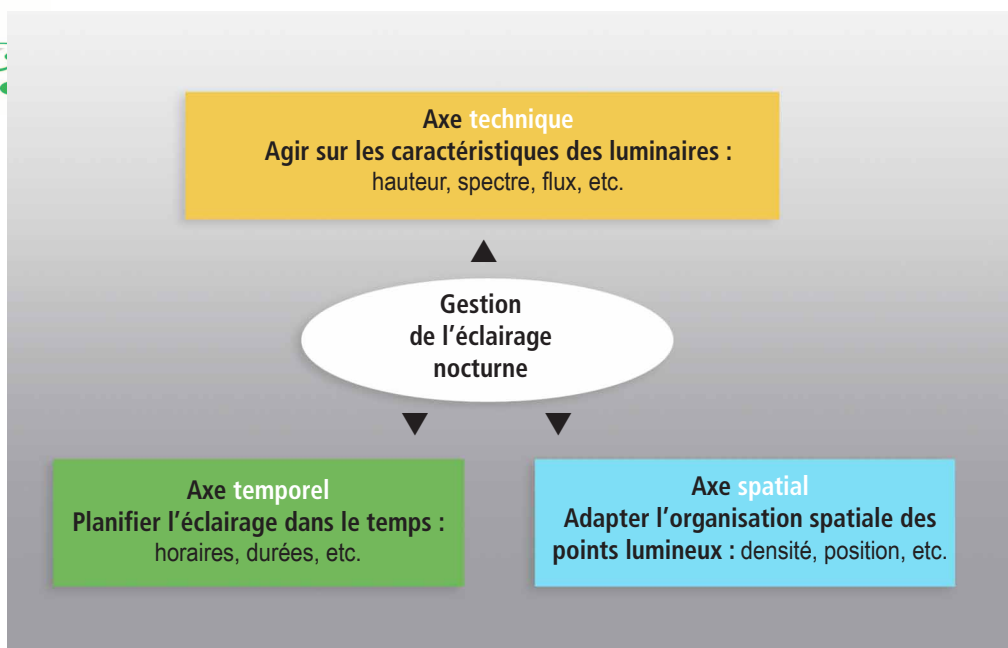
- 63 ■ 1 - Réglementation
- 66 ■ 2 - Caractéristiques des points lumineux
- 74 ■ 3 - Organisation spatiale des points lumineux
- 77 ■ 4 - Planification temporelle de l'éclairage
- 86 ■ 5 - Outils et moyens
- 98 ■ 6 - Suivre et évaluer ses actions



L'identification de la Trame est une première étape pour mettre en œuvre des actions en faveur de la faune nocturne. Le maintien ou la restauration d'éléments fixes du paysage, éléments arborés, haies, réseaux de mares, reste indispensable pour la faune nocturne comme dans tout projet de Trame verte et bleue. Cette partie C met volontairement de côté ces aspects pour se concentrer sur ce qui fait la spécificité de la Trame noire : le maintien et la restauration de l'obscurité dans et en dehors des continuités écologiques nocturnes. La préservation de la Trame noire existante au regard de l'évolution grandissante de la pollution lumineuse en France est en effet un enjeu majeur, et cela passe par une gestion rigoureuse de l'éclairage nocturne existant. Il est également nécessaire d'avoir une approche pro-active pour **reconquérir des espaces de nature la nuit**. Ces nouveaux espaces devront être intégrés à la Trame noire du territoire au cours du temps. Toute démarche de Trame noire doit donc permettre aussi d'identifier les secteurs où une restauration est prioritaire, ce qui correspond notamment aux secteurs à enjeux et aux points de conflits identifiés (voir Partie B).

Il existe une réglementation qui cadre la gestion de l'éclairage en France. Au-delà, l'éclairage artificiel doit être particulièrement raisonné au sein des continuités écologiques. Cette partie présente ainsi les différents paramètres clés de l'éclairage nocturne influant sur le niveau de pollution lumineuse vis-à-vis de la biodiversité. Pour chacun d'eux, des recommandations techniques sont présentées ainsi que la réglementation associée. Ces recommandations s'articulent selon trois axes d'intervention : technique, temporel et spatial (Figure 23) [46].

Figure 23



Axes d'intervention sur la pollution lumineuse. Source : d'après Sordello, 2018 [46].



1 – Réglementation

Un socle réglementaire en France concernant les nuisances lumineuses impose des prescriptions techniques en matière de gestion de l'éclairage nocturne. À ce titre, **l'arrêté ministériel du 27 décembre 2018 relatif à la prévention, à la réduction et à la limitation des nuisances lumineuses** a fait avancer la réglementation sur le sujet en complétant les mesures qui existaient déjà depuis 2012-2013 pour certains éclairages (publicités, enseignes, vitrines, monuments, etc.). Il existe désormais un corpus de mesures très précises pour les différentes catégories d'usages de l'éclairage, dont l'application est obligatoire, indépendamment de la Trame noire.

■ **Lois Grenelle de 2009 et 2010 :**
Elles ont inscrit la prévention, la réduction et la limitation des nuisances lumineuses dans le code de l'environnement. Une série de décrets et d'arrêtés ministériels ont ensuite été publiés afin de préciser le cadre réglementaire. L'ensemble de ces textes place la France parmi les pays pionniers en matière de régulation de l'éclairage nocturne.

■ **Décret 2011-831 du 12 juillet 2011 relatif à la prévention et à la limitation des nuisances lumineuses :**
Ce décret « fondateur » pose les bases de la réglementation en France en matière d'éclairage nocturne. Il instaure 7 catégories d'usage de l'éclairage (sécurité et déplacements, mise en valeur du patrimoine, équipements sportifs...).
Ce décret stipule également que des mesures plus strictes qu'ailleurs peuvent être prises dans certains espaces naturels comme les parcs nationaux, les réserves naturelles et les périmètres de protection, les parcs naturels régionaux, les parcs naturels marins, les sites classés et sites inscrits et les sites Natura 2000.

■ **Décret 2012-118 du 30/01/2012 relatif aux enseignes et publicités lumineuses entré en vigueur le 01/07/2012 :**
Ce décret impose l'extinction entre 1h et 6h du matin :
- des publicités lumineuses : dans les unités urbaines de moins de 800 000 habitants avec certaines exceptions (aéroports, éclairage par transparence, contexte événementiel...). En outre, la publicité lumineuse n'est pas autorisée à l'intérieur des agglomérations de moins de 10 000 habitants ne faisant pas partie d'une unité urbaine de plus de 100 000 habitants ;
- des enseignes lumineuses : partout (le cas échéant : extinction au plus tard une heure après la cessation d'activité et allumage au plus tôt une heure avant la reprise d'activité).
À noter que depuis le 01/07/2018 toutes les publicités/enseignes sont concernées (délai de mise en conformité de 6 ans échu).

Pour en savoir plus :
<https://bit.ly/2RRz5I3>

■ **Arrêté ministériel relatif à l'éclairage nocturne des bâtiments non résidentiels afin de limiter les nuisances lumineuses et les consommations d'énergie du 25/01/2013, entré en vigueur le 01/07/2013 et abrogé le 29/12/2018 :**

Cet arrêté encadrait l'extinction des structures concernées, entre 1h et 7h du matin ou le cas échéant de 1h après la fermeture jusqu'à 1h avant l'ouverture. Cet arrêté a été abrogé par l'arrêté ministériel du 27/12/2018 qui reprend ces dispositions.

■ **Loi n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages :**

Cette loi a inscrit dans le code de l'environnement plusieurs points importants.

Tout d'abord elle précise que :

- les paysages (reconnus comme patrimoine commun de la nation depuis 1995 par la loi Barnier) peuvent être diurnes et nocturnes ;
- le devoir de protection de l'environnement auquel chacun doit prendre part comprend aussi l'environnement nocturne ;
- la TVB doit tenir compte de la gestion de la lumière artificielle la nuit.

De plus, elle :

- précise que les objectifs de qualité paysagère des chartes de Parcs naturels régionaux doivent également viser à garantir la prévention des nuisances lumineuses ;
- introduit la notion de pollution lumineuse sous-marine.

■ **Arrêté ministériel du 27 décembre 2018 relatif à la prévention, à la réduction et à la limitation des nuisances lumineuses :**

Cet arrêté encadre désormais différents paramètres de l'éclairage tels que les horaires d'allumage/extinction de l'éclairage, la lumière émise au-dessus de l'horizontale, la densité de flux lumineux ou encore les températures de couleur. Il intègre également des mesures particulières pour certains espaces protégés listés par le décret du 12/07/2011.

Arrêté ministériel du 27/12/2018 :

<https://bit.ly/2EYxb5r>

Arrêté modificatif du 24/12/2019 :

<http://bit.ly/35MyPkX>

Pour en savoir plus :

<http://bit.ly/2rpNeIM>

Réglementation

2

La Partie C comporte des encadrés rappelant les mesures instaurées par l'arrêté du 27/12/2018.



2 – Caractéristiques des points lumineux

Quantité de lumière émise

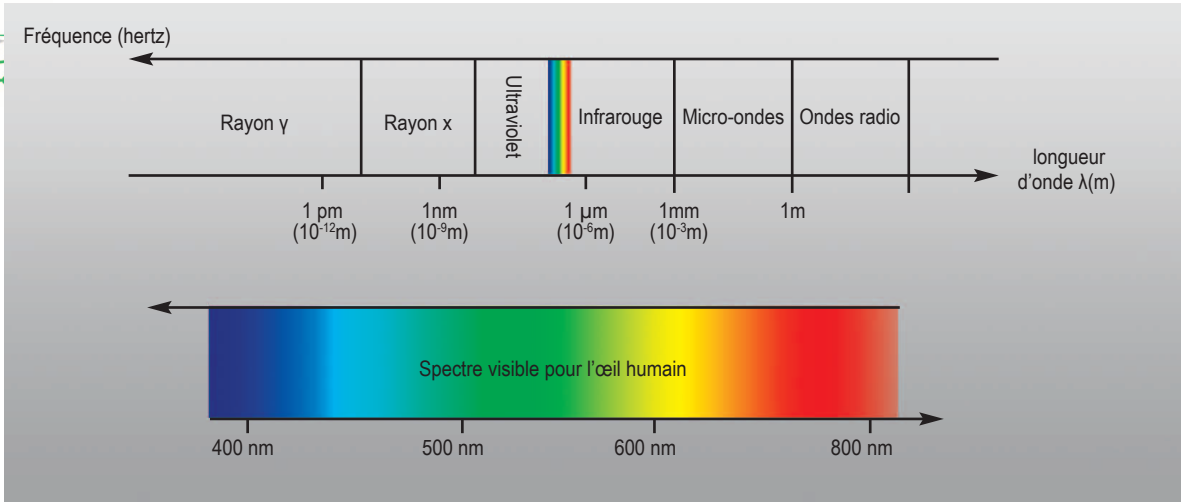
La connaissance scientifique sur les seuils de sensibilité de flux ou d'éclairement reste lacunaire. Des résultats sont disponibles pour quelques espèces seulement [71]. Des informations sont aussi disponibles sur la flore. En 1936, Matzke constatait que la chute des feuilles des arbres en ville était perturbée par les éclairages artificiels dès 10 lux [79]. Une étude récente a aussi été publiée sur les chauves-souris démontrant une distance d'évitement du lampadaire jusqu'à 50 m pour certaines espèces [72]. Une autre étude a aussi montré que même les « veilleuses » LED à énergie solaire, qui émettent des lumières allant de moins de 1 lux à quelques lux et que de nombreux particuliers disposent dans leur jardin, ont un impact sur les insectes en constituant pour eux des pièges attractifs [35].

L'arrêté ministériel du 27/12/2018 fixe désormais des prescriptions en termes de densité surfacique de flux lumineux installé (flux lumineux total des sources rapporté à la surface destinée à être éclairée, en lm/m^2). Par exemple, pour plusieurs catégories d'usage de l'éclairage (parcs et jardins, bâtiments non résidentiels, parcs de stationnements), le flux lumineux total émis (somme des flux des différentes sources de l'installation), au regard de la surface à éclairer, ne doit pas dépasser 25 lm/m^2 en agglomération. Pour les éclairages de voiries, le plafond est fixé à 35 lm/m^2 en agglomération et 25 lm/m^2 hors agglomération.

Composition de la lumière (impact des longueurs d'ondes)

La lumière est une onde qui se définit donc par une longueur d'onde, celle-ci traduisant aussi une couleur (Figure 24). L'œil humain voit dans les longueurs d'ondes allant du violet (environ 400 nm) au rouge (environ 800 nm). Cette plage de longueurs d'onde est aussi utilisée par de nombreuses espèces nocturnes. Ces dernières utilisent aussi les ultraviolets [80,81] et les infrarouges [82,83], qui nous sont invisibles mais néanmoins présents dans certaines technologies d'éclairage.

Figure 24



Longueurs d'ondes lumineuses. Source : Sordello, 2017 [84].

Une fonction essentielle de la lumière pour le vivant est de lui permettre de voir son environnement. Cependant, la lumière agit également sur différents processus comportementaux ou physiologiques indépendants de la vision. Par exemple, elle influe sur le rythme biologique et sur la régulation hormonale [85]. Chaque longueur d'onde possède ainsi une action relativement précise qui varie en fonction des groupes d'espèces (Figure 25). Cette sensibilité à telle ou telle longueur d'onde est encore relativement méconnue. Néanmoins, en l'état des connaissances, les plages correspondant au bleu, au vert et au rouge ressortent comme les plus impactantes [84]. En particulier, le bleu attire les insectes nocturnes qui constituent souvent la base des chaînes alimentaires. Le bleu est également impliqué dans la dérégulation des horloges biologiques (via le blocage de la sécrétion de **mélatonine*** chez les mammifères) [86].

Figure 25

	Ultraviolet (<380nm)	Violet (380-450nm)	Bleu (450-500nm)	Vert (500-550nm)	Jaune (550-600nm)	Orange (600-650nm)	Rouge (650-750nm)	Infrarouge (>750nm)
Plantes					?	?		
Crustacés	?	?	?		?	?		?
Arachnides	?							?
Insectes		?				?		?
Amphibiens								?
Oiseaux								
Poissons	?	?				?		?
Mammifères (hors Chiroptères)				?				
Chiroptères	?							?
Reptiles	?					?	?	?

Plages de longueurs d'ondes pour lesquelles moins un type d'impact est identifié (cases en noir) pour certains groupes biologiques. D'après Musters et al., 2009. Source : Sordello, 2017 [84].

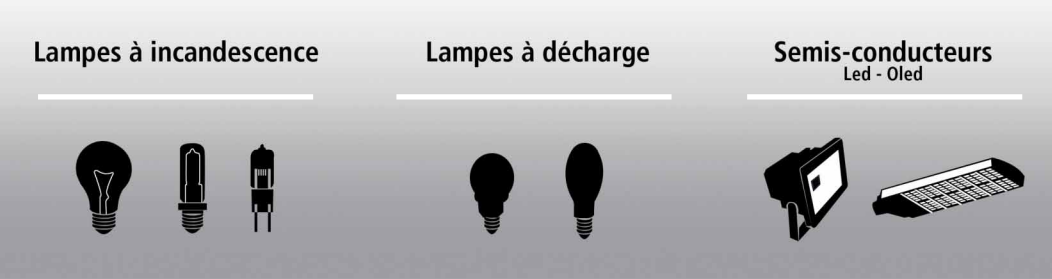
Les sources lumineuses utilisées en éclairage extérieur nocturne émettent de la lumière dont les longueurs d'onde leur sont propres. Il s'agit souvent d'un ensemble d'ondes lumineuses formant ainsi un spectre lumineux qui caractérise chaque source. Ces spectres peuvent être représentés par des spectrogrammes qui indiquent la proportion des longueurs d'ondes qui composent le faisceau lumineux.

* les termes en gras suivis d'un astérisque sont définis dans le glossaire en page 102.

Sources lumineuses et spectres associés

On distingue globalement trois grandes catégories de sources lumineuses dont les spectres lumineux sont variables selon les lampes (Figure 26).

Figure 26



Les trois grands types de sources de lumière artificielle.

Les **lampes à incandescence** sont formées d'une ampoule dans laquelle se trouve un filament traversé par un courant électrique. Ces lampes ne sont plus commercialisées en raison de leur faible efficacité énergétique.

Les **lampes à décharge** sont constituées d'une ampoule contenant un gaz émettant des photons en réaction à des décharges électriques. En fonction du gaz, la lumière émise vibrera avec une longueur d'onde déterminée. Par exemple, les lampes à vapeur de Sodium haute pression (SHP) produisent une lumière jaune/orangée, tandis que les lampes à vapeur de Mercure (désormais interdites à la commercialisation) produisent une lumière blanche plutôt rosée.

Les **lampes LED** (*Light Emitting Diode*) actuellement installées en éclairage extérieur sont construites à partir d'une LED bleue et d'une couche de phosphore à rayonnement jaune, ce qui produit la perception d'une lumière blanche par addition des deux rayonnements bleu et jaune. De par leur confection, les LED présentent ainsi dans leur spectre une forte proportion de bleu, notamment celles aux températures de couleur les plus froides (Figures 27 et 28).

Figure 27

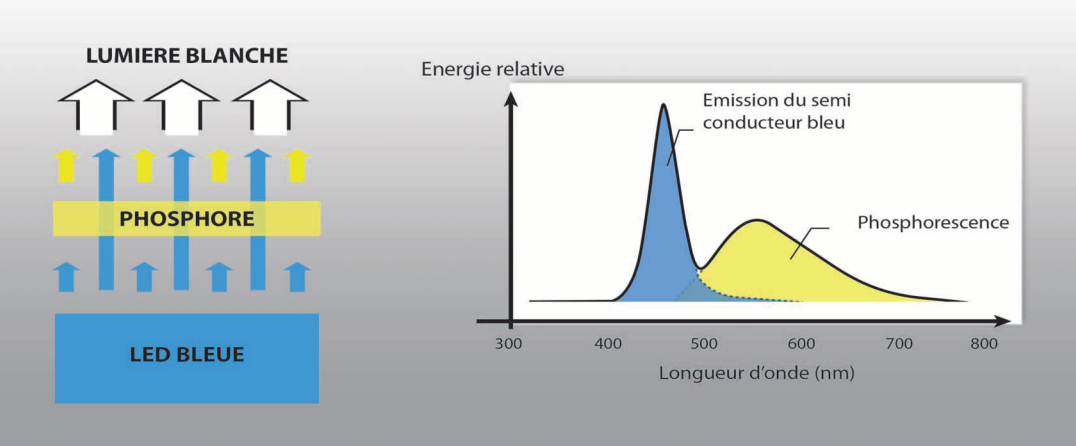
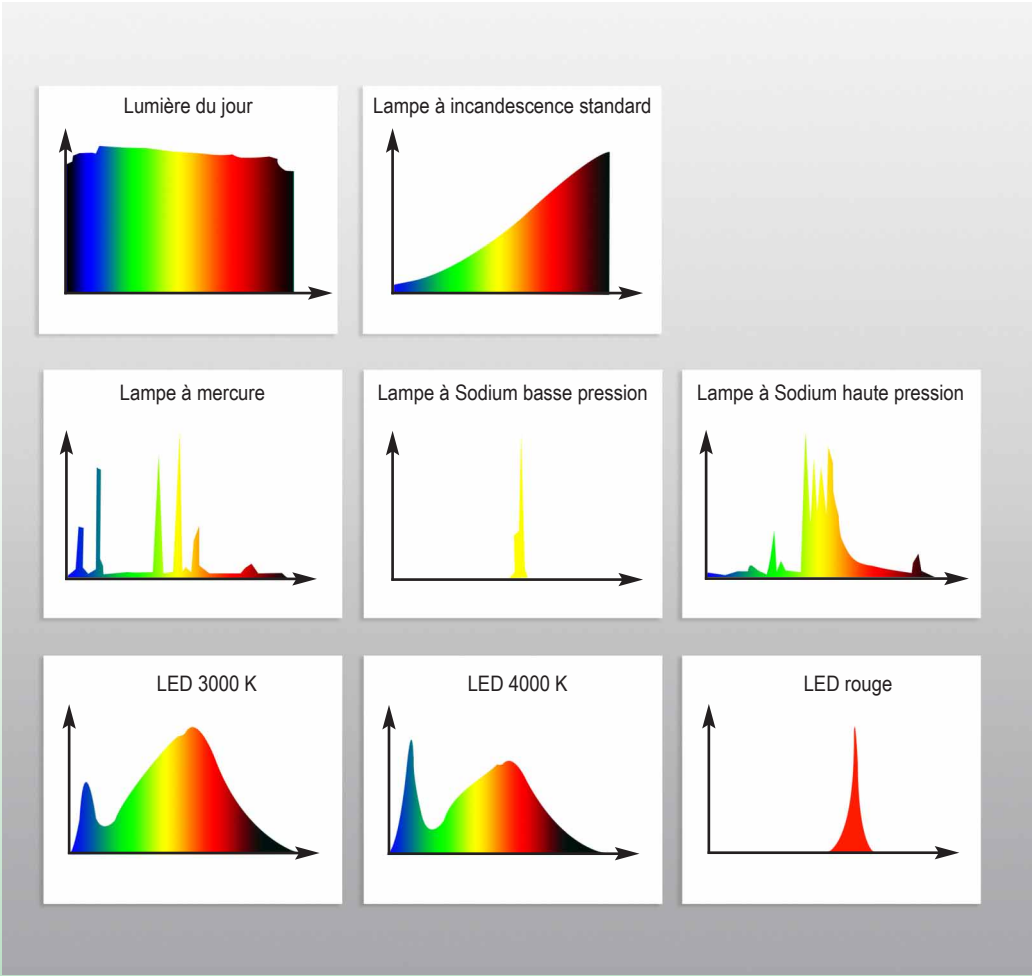


Schéma de conception d'une lampe LED blanche « type » et spectre lumineux associé. Source : Sordello, 2017 [84].

Figure 28



Spectres produits par la lumière du jour, les lampes à incandescence, les lampes à décharge et les LED (en abscisse : longueur d'onde en nanomètres ; en ordonnée : puissance relative).

Il est donc préconisé de privilégier les lampes émettant dans un spectre étroit. Cela diminue mécaniquement le nombre d'espèces et de fonctions biologiques impactées. Par ailleurs, les longueurs d'ondes nocives, notamment le bleu, doivent être réduites au maximum. La lumière bleue présente également un impact sur la santé humaine. Les lumières de couleur orange apparaissent moins néfastes tant pour la biodiversité nocturne que pour l'espèce humaine, en l'état des connaissances.

Les effets de la lumière bleue sur la santé humaine

Le rapport de l'Anses publié en 2019 analyse les impacts de la lumière bleue et met à jour une étude précédente datant de 2010. Concernant la santé, les éclairages LED évoqués dans le rapport sont essentiellement les éclairages intérieurs (lampes, jouets...), les écrans (tablettes, smartphones...) ou encore les phares de voitures. L'expertise menée en 2010 mettait en évidence la toxicité de la lumière bleue pour la rétine ainsi que le risque d'éblouissement causé par les LED. Depuis, la connaissance scientifique s'est renforcée et ces effets sont confirmés. Les éclairages domestiques à LED de type « blanc chaud » présentent un faible risque de phototoxicité. En revanche, d'autres types d'éclairage à LED tels que des lampes torches ou les phares automobiles peuvent émettre des lumières particulièrement riches en bleu et présenter des risques pour la santé. Par ailleurs, de nouveaux effets dus à une exposition aigüe et à long terme à la lumière riche en bleu sont mis en évidence : baisse de la vue, risques augmentés de dégénérescence maculaire liée à l'âge, etc.

Comme la plupart des mammifères, l'Homme dispose d'un système de régulation de son horloge interne basé sur la lumière. Cette dernière joue le rôle de synchronisateur : la lumière bleue inhibe la production de **mélatonine*** par la glande pinéale située dans le cerveau. La mélatonine est l'hormone qui provoque l'endormissement, elle gère donc le cycle veille/sommeil et de très nombreuses autres fonctions dans l'organisme (humeur, appétit, etc.). Le rapport de l'Anses montre qu'une exposition, même très faible, à cette lumière le soir ou la nuit perturbe les rythmes biologiques et donc le sommeil, notamment via les écrans.

En conséquence, l'Anses recommande de limiter l'usage des dispositifs à LED les plus riches en lumière bleue, tout particulièrement pour les enfants. Elle préconise également de privilégier des éclairages intérieurs de type « blanc chaud ». L'Anses appelle aussi à diminuer autant que possible la pollution lumineuse pour préserver l'environnement ou à choisir des lampes classe 0 ou 1 selon la norme européenne EN 62 471. Celle-ci est applicable à toutes sources lumineuses. Elle définit quatre groupes en fonction du risque photobiologique (de 0 : exempt de risque, à 3 : risque élevé).

Rapport de l'Anses : <https://bit.ly/38wSpSs>

Les **lampes à décharge** (principalement à vapeur de Sodium) produisent une lumière jaune/orange et il a été démontré qu'elles sont à ce titre moins défavorables à certaines espèces [87–89]. Or, on assiste actuellement à une **conversion massive** des sources d'éclairage extérieur - et intérieur - **vers des lampes LED**. Ces dernières peuvent permettre en effet de réaliser des économies d'énergie importantes et présentent des avantages techniques dans le pilotage de l'éclairage : la lumière peut faire l'objet d'une gradation et les éclairages peuvent être soumis à des systèmes de détection de présence pour répondre avec plus de précision aux besoins d'éclairage. Or, les LED généralement commercialisées en éclairage extérieur, et meilleur marché, produisent une lumière relativement « froide », riche en bleu, avec une **température de couleur*** (exprimée en Kelvin, K) élevée : 3 000 K si l'on est en conformité avec la valeur maximale autorisée par l'arrêté du 27/12/2018, mais parfois plus dans certaines situations réelles sur le terrain. La figure 29 illustre l'ambiance générée par des lampes de différentes températures de couleur.

Figure 29



Rendu d'éclairages avec différentes températures de couleur.

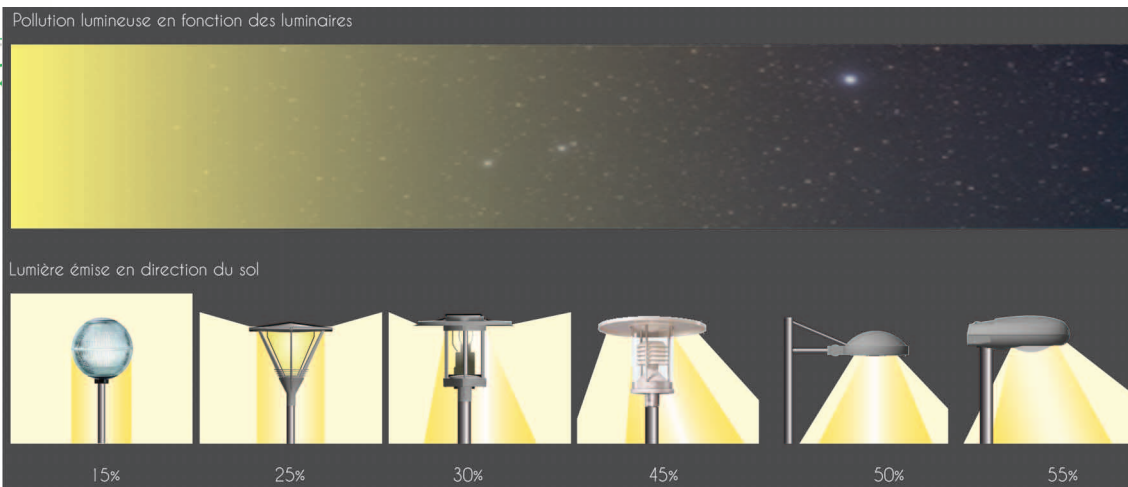
Dans le cas où l'implantation de LED est décidée, il est donc préconisé de choisir des LED dont la température de couleur est la plus basse possible, pour limiter les effets néfastes liés aux longueurs d'ondes bleues [90]. En effet, plus la température de couleur est basse, moins la proportion de bleu dans le rayonnement est élevée. Il est donc souhaitable d'installer des LED émettant un « blanc chaud », soit 2 400 K ou moins. Néanmoins, les LED blanches chaudes seraient aussi impactantes que les LED blanches froides pour certains organismes, comme par exemple les chauves-souris [91] ou les vers luisants [92].

Certains fabricants proposent désormais des **LED oranges ou ambrées (2000 K, ou moins)**. Ces LED ont un rendement moindre que les LED blanches (leur efficacité énergétique est divisée par 2 par rapport à une LED 3000 K dans l'état actuel de la technologie) et sont un peu plus coûteuses à l'achat mais elles apparaissent comme un bon compromis puisqu'elles présentent l'avantage spectral des lampes à Sodium pour la biodiversité (lumière ambrée moins impactante) tout en permettant un pilotage fluide de l'éclairage. Au Canada, la ville de Sherbrooke a converti tous ses éclairages en LED ambrées.

●orientation des luminaires

L'orientation des luminaires influence la proportion de **lumière émise vers le ciel et plus largement au-dessus de l'horizontale, qu'il convient de réduire au maximum pour diminuer les halos lumineux** (Figure 30). En effet, les particules de lumière s'associent avec les particules en suspension dans l'atmosphère, ce qui crée un halo lumineux bien visible au-dessus des villes. Il est donc nécessaire de circonscrire la lumière à la zone que l'on souhaite éclairer, qui est généralement au sol (une chaussée, un trottoir). Les éclairages en contre-plongée, souvent installés pour la mise en valeur des monuments voire des arbres, sont également très néfastes. Les luminaires de types « boules » qui émettent une partie importante de leur lumière vers le ciel doivent être proscrits.

Figure 30



Efficacité de flux et pollution lumineuse en fonction du type de luminaire. Source : Acere.

L'orientation des luminaires influence en retour les risques d'éblouissement. En effet, dirigé vers le bas, un luminaire aura alors davantage de risque d'être vu au sol ou à mi-hauteur par des animaux (et des humains) en approche et donc d'engendrer des éblouissements. La limitation de l'éblouissement pour une lampe à décharge est traitée majoritairement par la position de la lampe dans le réflecteur (appelée « défilement »). Ainsi, les lampes à décharge ne doivent pas dépasser de leur réflecteur pour limiter au maximum cette vision directe de la source lumineuse par l'animal (ou l'utilisateur).

En ce qui concerne les LED, c'est davantage une optimisation des optiques (capsules) englobant les LED qu'il faudrait envisager pour diminuer l'éblouissement. En effet, l'éblouissement n'est pas simplement dû au caractère apparent de la source lumineuse, il dépend aussi de la quantité de lumière émise relativement à la surface d'émission (ce qui correspond à la **luminance***). Ceci explique qu'à flux équivalent, une puce LED visible distinctement sera plus éblouissante qu'une lampe à décharge ou une lampe à incandescence, dont la surface d'émission correspond à toute l'ampoule (donc plus grande que pour une LED). C'est un autre des problèmes engendrés par l'usage massif des LED et notamment de la conversion actuelle du parc d'éclairage public. Rappelons qu'un luminaire LED se compose de plusieurs puces LED réparties sur une plaque, appelée module LED.

Sauf équipé d'un diffuseur (ou vasque opalisée) englobant les puces LED, qui masquerait alors les effets de « pointe » de chaque puce LED, cette perception de « pics » de luminance très ponctuels reste et impacte l'œil humain (et *a fortiori* celui de l'ensemble des espèces munies d'un système visuel équivalent ou plus sensible). Une carte de luminance d'un luminaire LED montrerait ces « pics » de luminance à plusieurs milliers de cd/m². Une vigilance toute particulière doit être apportée sur ce point dans les continuités écologiques. Il serait nécessaire de développer des diffuseurs suffisamment performants pour « homogénéiser » le flux lumineux de chaque puce LED sur l'ensemble de la surface d'émission du luminaire LED. Soulignons ici que, même si l'on respecte l'exigence de limitation du taux d'éblouissement sur les voies routières de la norme d'éclairage EN 13-201, cela ne permet pas pour autant de s'assurer de la réduction de l'éblouissement de la faune qui, par définition, ne verra pas la source dans un axe et un angle prédéfinis comme c'est le cas des véhicules en circulation.

Enfin, il est à noter que le déploiement des LED engendre un risque d'augmentation du nombre de points lumineux par « effet rebond ». En effet, la faible consommation électrique des LED peut se traduire par l'installation, par une collectivité par exemple, de points lumineux plus nombreux tout en réalisant malgré tout des économies d'énergie, ce qui au final n'est pas satisfaisant pour la biodiversité. En outre, la facilité d'installation de certaines LED permet l'introduction d'éclairage facile et « gratuit » (LED solaires) dans des endroits où l'implantation d'un éclairage fixe aurait été impossible ou trop coûteuse et aurait forcé les usagers à trouver des alternatives (ex. lampe de poche). Un exemple typique de cet effet rebond est la multiplication des LED solaires pour l'usage des particuliers (décoration de Noël, appliques murales, veilleuses de cheminement, lumières de jardin, etc.).

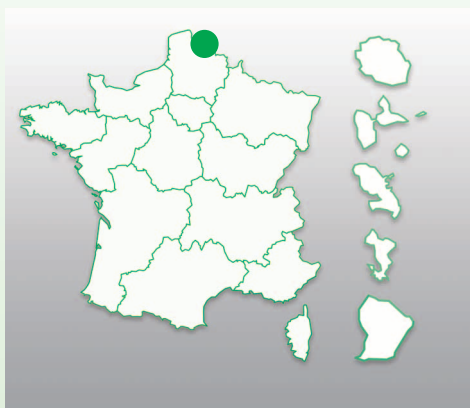
Tableau 4. Avantages et inconvénients des LED

Avantages	Inconvénients
■ Avantages économiques et énergétiques (durée de vie importante, plus grande efficacité énergétique, compatibilité avec du courant continu pour une alimentation directe à partir d'une énergie renouvelable) ■ Pilotage facile des lampes (gradation, allumage/extinction) : possibilité d'utilisation de détecteurs de présence ou d'un éclairage à la demande ⇒ optimisation de l'éclairage dans la durée et en quantité (moins de lumière « perdue ») ■ Lumière plus ciblée dans l'espace ⇒ optimisation des surfaces éclairées et moins de diffusion sur les milieux naturels adjacents ■ Nouveaux luminaires généralement mieux orientés ⇒ moins de lumière diffusée au-dessus de l'horizontale et diminution des halos lumineux (selon l'inclinaison du luminaire et la proportion de bleu dans le spectre)	■ Coût d'acquisition plus élevé, mais en baisse ■ Effet de « papillotement lumineux » ou de scintillement (effet <i>flicker</i>) visible selon les espèces, en fonction de leur fréquence de fusion critique ■ Risque d'éblouissement pour la faune, du fait d'une luminance plus élevée qu'avec des lampes à décharge ■ Émissions de lumières bleues nuisibles pour le vivant, dont la proportion dans le spectre est plus ou moins importante selon les LED ■ Risque d'augmentation du nombre de points lumineux par « effet rebond », et donc <i>in fine</i> de la pollution lumineuse

L'arrêté ministériel du 27/12/2018 fixe des prescriptions en termes de lumière permise au-dessus de l'horizontale pour les éclairages liés à la sécurité, aux déplacements et au stationnement : un maximum de 1 % selon les données fabricant et de 4 % après installation sur site. Pour rappel, depuis la parution de l'arrêté ministériel et jusqu'au 1^{er} janvier 2020, les systèmes d'éclairage qui le permettaient « facilement » devaient être réorientés vers le sol. Notons que les installations d'éclairage dont la proportion de lumière émise au-dessus de l'horizontale en condition d'installation est supérieure à 50 %, comme par exemple les « boules », doivent être remplacées par des luminaires conformes aux dispositions de l'arrêté, au plus tard le 1^{er} janvier 2025. Cette obligation concerne les éclairages liés à la sécurité, aux déplacements et au stationnement ainsi que les installations de mise en lumière du patrimoine dans les périmètres des sites astronomiques et dans les réserves naturelles et leurs périmètres de protection.

Dans le cadre du projet Luciole, la ville de Lille a expérimenté l'adaptation de ses éclairages urbains sur l'île de la Citadelle (Retour d'expérience 8).

Projet Luciole à Lille



Porteur de projet

Ville de Lille

Partenaires

Partenaires du projet de recherche « Tramenoire »

Coût global

Étude et travaux : 615 000 € HT, financés à 70 % par le FEDER « Nature en ville »

Contact

Yohan Tison - ytison@mairie-lille.fr

Dans le cadre de son plan biodiversité et de son plan lumière, la ville de Lille s'est engagée dans l'élaboration et la mise en œuvre de sa Trame noire. Cette démarche expérimentale,

appelée projet Luciole (Lumière citadine optimisée pour l'environnement), s'inscrit dans la continuité des études réalisées précédemment et ayant abouti à l'identification de la Trame noire, à savoir la modélisation des continuités écologiques de la Ville de Lille (2013) et le projet de recherche « Tramenoire » sur l'agglomération lilloise en 2015-2016 (Retour d'expérience 4).

Le projet Luciole est mené dans l'espace semi-naturel de l'île de la Citadelle, considéré à l'échelle de la métropole européenne de Lille comme un « cœur de nature » et situé au bord du corridor principal du secteur : le canal de la Deûle. Le site est reconnu pour son rôle important dans la préservation des chiroptères grâce à la présence de fortifications en pierre qui peuvent servir d'abris et à sa mosaïque de milieux boisés, humides, aquatiques, prairiaux et souterrains. Le projet vise à renforcer ce corridor écologique pour les chauves-souris et les papillons de nuit en réduisant au maximum les nuisances lumineuses qui fragmentent les espaces pour ces espèces. Il vise à réduire les consommations d'énergie par l'emploi d'éclairages innovants en remplacement du matériel vétuste identifié et contribue également à améliorer le cadre de vie et à assurer la sécurité des biens et des personnes.

Le projet Luciole s'appuie sur les éléments produits par différentes études et comprend le changement de 300 points lumineux sur une bande de 2 600 mètres de long, de 50 mètres de large, totalisant une quarantaine d'hectares. L'état initial réalisé en 2017 a révélé la présence de 9 espèces de chauves-souris et a confirmé l'impact très négatif des lampes à halogénures métalliques sur la faune. Plusieurs typologies d'éclairages et modes d'allumage ont été testés pour aboutir au meilleur compromis entre bonne circulation des espèces et confort des usagers à travers différents paramètres :

- température de couleur : installation de LED avec des températures de couleurs inférieures à 3 000 K : utilisation des LED ambrées à 1 700 K en période d'activité des chiroptères, 2 200 K sur les semaines de transition et 2 700 K en période hivernale ;
- allumage par détecteurs de présence à infrarouge ;
- gradation en première partie de nuit puis extinction et allumage selon détection en mode « chenillard » (les lampadaires s'allument successivement au fur et à mesure du cheminement des passants) ;
- sur les aménagements récents uniquement, travail sur le flux de lumière via la généralisation de coupe-flux sur mesure, dispositif faisant obstacle à la lumière et permettant de ne pas éclairer en direction des milieux aquatiques et ainsi de réduire l'impact de la lumière sur ces milieux ;
- sur un axe de circulation important, allumage différencié en fonction du type d'utilisateur (voiture, vélo, piéton).

19



Lampadaire comportant plusieurs modules LED de température de couleurs différentes et munis de coupe-flux. Source : Yohann Tison - Ville de Lille.



3- Organisation spatiale des points lumineux

Vers une gestion différenciée de l'éclairage

En priorité, il est important de réduire autant que possible le nombre et la densité des points lumineux. Tous les espaces n'ont pas vocation à supporter le même éclairage : **une gestion différenciée de l'éclairage** doit ainsi être mise en place. Il est possible de proposer une hiérarchisation dans la nécessité d'éclairer, en fonction par exemple du statut d'intérêt ou de protection des espaces (aires protégées ou autres zones d'intérêt écologique). Cette gestion différenciée peut donc se traduire par **une diminution de la densité de points lumineux, voire leur suppression totale, dans les continuités écologiques et dans les secteurs à enjeux identifiés**. La distance entre les points lumineux peut aussi être augmentée de manière à favoriser des « trouées noires » pour le franchissement de la faune. Enfin, une gradation des mesures peut aussi être envisagée concernant certaines caractéristiques des luminaires ou encore la dimension temporelle de l'éclairage.

À une échelle plus fine, certains sites sont particulièrement sensibles car ils sont très recherchés par la faune nocturne (sites dits « pittoresques » tels que les ponts, falaises, vieux bâtis, clochers, ...). Dans le même temps, ces sites font souvent l'objet d'une mise en valeur par l'éclairage nocturne. Une étude a montré que des églises éclairées hébergeaient deux à trois fois moins de colonies de chauves-souris [93]. Au sein des continuités écologiques, ces sites devraient faire l'objet de mesures plus fortes, voire d'une absence totale d'éclairage.

Certains milieux sont aussi très sensibles à la pollution lumineuse, notamment les milieux aquatiques car la lumière :

- pénètre dans l'eau (effets sur les organismes aquatiques) ;
- se reflète dans l'eau (effet sur la vision de certains animaux comme les insectes sensibles à la lumière polarisée, c'est-à-dire à la lumière réfléchie) ;
- diffuse sur les milieux adjacents (faune amphibie ou terrestre qui utilise les cours d'eau ou leurs structures associées pour vivre et se déplacer...) ;
- forme des barrières transversales au niveau des ponts éclairés (ou sur lesquels la lumière se reflète) aux déplacements des espèces aquatiques ou aériennes qui remontent ou descendent les cours d'eau.

L'arrêté ministériel du 27/12/2018 souligne l'importance de maintenir dans la pénombre les espaces aquatiques et leurs abords ainsi que le littoral (art. 4 alinéa 5). Ainsi, sauf cas particuliers, il est désormais interdit d'éclairer directement les cours d'eau, le domaine public fluvial (DPF), les plans d'eau, lacs, étangs, le domaine public maritime (DPM) (parties terrestre et maritime). Sont exclus notamment de cette interdiction les sites en Autorisation d'occupation temporaire (AOT) au sein du DPM et DPF.

Des dispositions spécifiques et plus restrictives existent sur les **espaces protégés** comme les réserves naturelles, les parcs nationaux, les parcs naturels régionaux et les parcs marins. Ainsi, dans les réserves naturelles et autres périmètres de protection, la température de couleur ne peut pas dépasser 2400 K et les seuils de densité surfacique de flux lumineux qui s'appliquent sont ceux « hors agglomération » (soit 25 lm/m² pour les éclairages de voirie). Dans les cœurs de parcs nationaux, la température de couleur maximum est de 2 700 K en agglomération et 2 400 K hors agglomération. Le préfet peut mettre en place des prescriptions plus strictes dans les réserves naturelles, les parcs nationaux, les parcs naturels régionaux et les parcs marins, après consultation des communes et avis des structures gestionnaires.



© Samuel Busson - Cerema.

Cours d'eau à proximité d'un site Natura 2000 éclairé par des lampes à sodium haute pression.

Choix des revêtements du sol

Le sol joue également une grande part dans la quantité de lumière émise vers le ciel selon sa capacité à absorber ou renvoyer la lumière. À titre d'exemple, la neige renvoie fortement la lumière ce qui accentue la pollution lumineuse (notamment dans le cas d'éclairages liés aux activités de sports d'hiver, ce qui multiplie donc leur impact). Chaque matériau comporte un coefficient de réflexion qui engendre une réverbération plus ou moins forte des rayons lumineux. Ainsi, dans le cas d'aménagements urbains, **pour réduire l'impact de la lumière sur la biodiversité dans les secteurs à enjeux, il est préférable de choisir sous les luminaires des matériaux ayant un faible coefficient de réflexion pour diminuer ce réfléchissement vers le ciel.** Bien entendu, le choix d'un revêtement répond à de nombreux critères, parmi lesquels le caractère naturel, sa perméabilité et son aspect qualitatif. Notons qu'un coefficient de réflexion élevé permettra de réduire le flux lumineux et donc de réduire la consommation d'énergie. De plus, des revêtements à coefficient de réflexion élevé joueront un rôle dans l'adaptation de la ville au changement climatique en renvoyant durant la journée la lumière du soleil vers le ciel, et en luttant ainsi contre l'effet d'îlot de chaleur urbain. Il s'agit de choix ou de compromis à faire au regard des enjeux (biodiversité, fréquentation humaine) identifiés sur les différents secteurs du territoire à éclairer, à éclairer peu ou à ne pas éclairer.

Le tableau ci-après propose une analyse rapide par grand type de revêtement au regard du coefficient de réflexion, du caractère naturel et de la perméabilité du revêtement.

Tableau 5. Analyse des avantages et inconvénients de différents grands types de revêtements

Type de revêtement	Coefficient de réflexion	Caractère naturel et perméabilité	Classement
Revêtements bitumineux noirs	Très faible	Nul	- -
Revêtements minéraux clairs : ciment, pierre, résines	Très élevé	Nul	- - -
Revêtements sablés clairs stabilisés	Très élevé	Moyenne	- -
Terre	Faible	Bon	+ +
Végétalisé (herbe, pelouse)	Faible	Élevé	+ + +

Il ressort - assez logiquement - qu'une surface végétalisée, possédant à la fois un coefficient de réflexion faible, un caractère plus naturel et une perméabilité plus élevée, apparaît comme le meilleur choix. Ceci va également dans le sens de l'adaptation de la ville au changement climatique, la végétation contribuant à la « climatisation » naturelle de la ville grâce à l'évapotranspiration des plantes. S'il est donc souhaitable d'avoir des espaces herbacés sous les éclairages pour en réduire la réflexion, rappelons que la lumière artificielle nocturne a des effets sur les rythmes biologiques, la croissance, la physiologie ou encore la reproduction des végétaux y compris herbacés [94] et sur tous les cortèges de faune associés à ces milieux ouverts (orthoptères, papillons de nuits, micromammifères, etc.) [95]. Il s'agit donc de trouver un compromis entre limitation de la réverbération et préservation des écosystèmes prairiaux, dont la solution doit avant tout passer par une réduction autant que possible de l'éclairage lui-même.



4 – Planification temporelle de l’éclairage

Optimisation de la durée d’éclairage

La planification temporelle consiste à réduire la durée de l’éclairage en ciblant les moments où celui-ci est le plus utile. Faire correspondre l’allumage et l’extinction de l’éclairage avec les besoins des humains permet de réduire fortement la pollution lumineuse sans perdre de confort.

Réglementation

6

La réglementation française impose des horaires d’allumage et d’extinction pour les différentes catégories d’usage de l’éclairage (arrêté ministériel du 27/12/2018) ainsi que pour les enseignes et les publicités lumineuses (décret du 30/01/2012).

Où ? Cas général, sur tout le territoire	Installations d’éclairage auxquelles les dispositions s’appliquent	Allumage (icône = au plus tôt au coucher du soleil)	Extinction (de nuit) Au plus tard :	Allumage (matinal) Au plus tôt :
	Eclairage extérieurs (a) liés à une activité économique et situés dans un espace clos		 1h après la fin d’activité	ou à 7h du matin 1h avant le début d’activité
	Eclairage de mise en lumière du patrimoine et des parcs et jardins(b)		ou à 1h du matin 1h après la fermeture des parcs et jardins	
	Éclairage des bâtiments non résidentiels (d)		 à 1h du matin	
	Éclairage intérieur des locaux à usage professionnel (d)		 1h après la fin d’occupation des locaux	ou à 7h du matin 1h avant le début d’activité
	Eclairage de vitrines de magasins de commerce ou d’exposition (d)		ou à 1h du matin 1h après la fin d’activité	ou à 7h du matin 1h avant le début d’activité
	Eclairage des parcs de stationnement (e) annexés à un lieu ou zone d’activité		 2h après la fin d’activité	ou à 7h du matin 1h avant le début d’activité
	Eclairage des chantiers extérieurs (g)		 1h après la fin d’activité	

Icônes créées par freepik et ibrandify/freepik

© Cerema

En ce qui concerne l'éclairage public des rues, la réglementation actuelle n'impose pas d'extinction en cœur de nuit. Plusieurs types d'initiatives sont cependant développés par les collectivités. L'allumage et l'extinction des luminaires peuvent être déclenchés par l'intermédiaire d'**horloges astronomiques***. Elles permettent de définir pour chaque jour de l'année l'heure d'allumage de l'éclairage public en fonction de sa position géographique et compte tenu des heures de lever et de coucher du soleil. Chaque armoire électrique desservant les lampadaires à éteindre peut ainsi être équipée d'une horloge astronomique. Le coût est d'environ 500 € HT pose comprise par horloge, et donc par armoire électrique. Les horloges astronomiques permettent une uniformité dans l'allumage et l'extinction des armoires. Elles peuvent par exemple être réglées pour que l'éclairage s'allume au crépuscule astronomique et se coupe en cœur de nuit.

Les cellules photoélectriques, quant à elles, réagissent à la luminosité ambiante. Elles peuvent donc (ou pourraient potentiellement) prendre en compte des événements météorologiques (baisse des puissances au regard de la couverture nuageuse qui augmente la luminosité ambiante) ou la luminosité apportée naturellement par la lune en fonction de son cycle. À ce jour, les cellules photoélectriques sont plutôt réglées sur un seuil de 5 lux et présentent des risques de dysfonctionnement (allumage en plein jour) ou de dérèglement (dû à l'encrassage par exemple).

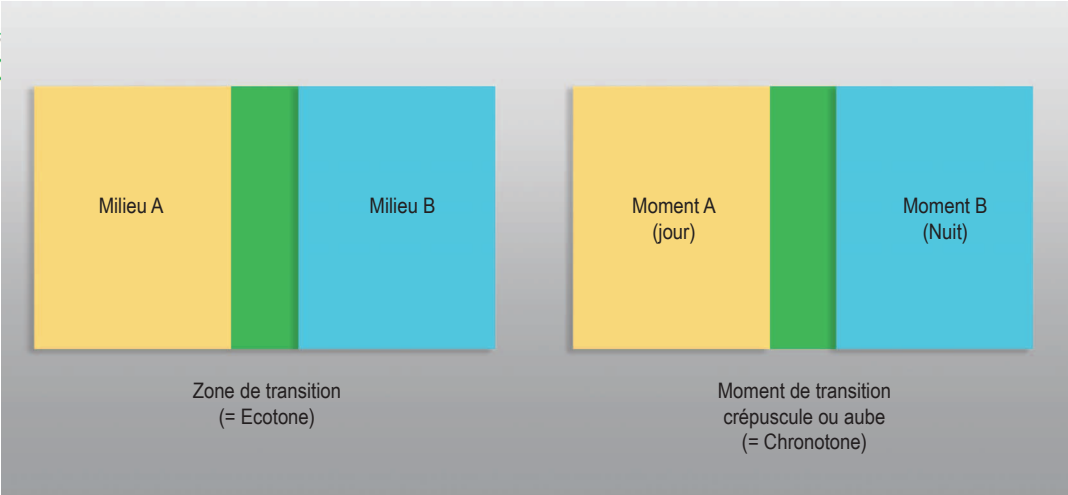
Depuis quelques années, des systèmes d'éclairage dits « intelligents » se développent également. Ces éclairages sont qualifiés ainsi car ils s'adaptent aux besoins des usagers grâce, par exemple, à des détecteurs de présence en s'allumant et s'éteignant lors du passage de véhicules ou de personnes. De tels dispositifs sont devenus possibles grâce aux nouvelles technologies de sources lumineuses, en particulier les LED qui permettent la gradation et même des ON/OFF réguliers, contrairement aux lampes à vapeur de Sodium. Certains dispositifs permettent même à l'usager de contrôler lui-même l'allumage, via son smartphone par exemple. Ainsi, l'éclairage peut être ajusté sur le plan temporel au plus près des besoins toute la nuit.

Tableau 6. Comparaison des différents dispositifs d'allumage programmé ou autonome de l'éclairage public

Technologie	Principe (allumage, extinction voire gradation, selon la source lumineuse utilisée)	Avantage	Inconvénient
Horloges classiques	En fonction d'un horaire fixe	Permet de mettre en place une extinction en cœur de nuit	Souplesse et adaptabilité faibles de l'éclairage au besoin réel
Horloges astronomiques	En fonction du cycle solaire (horaires de coucher/lever du soleil)		
Cellules photosensibles	En fonction de la luminosité ambiante	Permet la prise en compte de la luminosité extérieur (conditions météo, lune, lumière issue d'autres éclairages artificiels) et donc le besoin réel d'éclairage	Cellules souvent réglées sur un seuil de 5 lux Nécessite un entretien régulier pour éviter un dérèglement au fil du temps par encrassage de la cellule
Détecteur de présence	En fonction du passage d'un véhicule ou d'une personne	Permet d'éclairer uniquement lorsqu'il y a un usager	Risque d'allumage au passage d'animaux en fonction de la sensibilité du détecteur

Cet ajustement de l'éclairage tout au long de la nuit - et donc également en début et en fin de nuit - est très important car la pratique d'extinction en cœur de nuit ne peut suffire (voir ci-après). En effet, une grande partie des animaux nocturnes semble en réalité active surtout au crépuscule et à l'aube, périodes que l'on peut qualifier de **chronotones*** (moment de jonction entre jour et nuit à l'instar des « écotones » qui constituent des jonctions entre deux écosystèmes sur le plan spatial, Figure 31) [54]. Il est possible que ces moments de transition concentrent l'activité biologique d'un certain nombre d'espèces considérées comme diurnes ou nocturnes, qui cherchent à maximiser le compromis « voir sans être vues » (vues par leurs prédateurs notamment).

Figure 31



Écotone et chronotone. Source : d'après Sordello et al., 2014 [54].

Il est essentiel d'ajuster temporellement l'éclairage sur ces périodes « charnières » du cycle journalier et les dispositifs d'éclairages « intelligents » constituent ici une réponse complémentaire à la pratique d'extinction en cœur de nuit. Il est donc préconisé d'utiliser la détection de présence sur toutes les voiries à faible fréquentation (lotissement, voies de dessertes, zones industrielles, voies cyclables et piétonnes, etc.) afin d'ajuster l'éclairage au besoin. Les détecteurs de mouvement doivent être réglés de sorte que les lampes ne s'allument pas au passage d'animaux sauvages comme domestiques (chats, chiens). En outre, il faut noter que des allumages/extinctions réguliers tout au long d'une nuit (dans le cas de détecteurs de présence par exemple) peuvent engendrer de nouveaux problèmes pour la faune au regard du stimulus visuel (clignotement) que cela représente (en effet, la plupart des vertébrés par exemple sont adaptés pour réagir au mouvement visuel, synonyme de danger potentiel).

Extinction de l'éclairage public en cœur de nuit

Plusieurs milliers de communes en France coupent leur éclairage public en cœur de nuit. On constate que, pour les communes recensées sur le site NuitFrance¹², l'extinction nocturne est majoritairement pratiquée entre 23h / minuit et 5h / 6h du matin. Dans certains cas, l'éclairage n'est pas rallumé le matin voire totalement supprimé l'été (Retour d'expérience 9 dans le PNR du Gâtinais français). L'extinction peut être totale ou partielle, sur tout ou partie du territoire communal, toute l'année ou non.

Une extinction nocturne totale sur une période sensible pour la faune est menée depuis plusieurs années à la Réunion dans le cadre des « Nuits sans lumière » : durant près de 2 mois, plusieurs communes n'allument plus leur éclairage public sur l'ensemble de leur territoire ou par secteurs pour protéger les pétrels de Barrau et pétrels noirs de Bourbon de la pollution lumineuse.

■ Quelle efficacité pour la biodiversité ?

Deux études menées sur les chauves-souris [96,97] montrent que l'efficacité de la mesure dépend avant tout de la plage horaire sur laquelle l'extinction est pratiquée. Les résultats seraient probablement semblables pour d'autres espèces dont l'activité est en réalité plus crépusculaire que strictement nocturne (ex : mammifères terrestres, rapaces nocturnes). En effet, comme expliqué précédemment, de nombreuses espèces animales présentent un pic d'activité juste après le crépuscule puis un autre avant l'aube. L'extinction doit donc être pratiquée le plus tôt possible pour ne pas survenir après l'émergence de ces espèces.

L'extinction en cœur de nuit est probablement très bénéfique pour certains groupes actifs en cœur de nuit, pour la flore ou pour toutes les espèces se dirigeant avec le ciel étoilé (oiseaux en migration par exemple). Elle rétablit d'emblée la visibilité du ciel nocturne, ce qui concorde aussi avec les enjeux pour les humains (astronomie, patrimoine nocturne, tourisme de nuit). Enfin, cette mesure permet d'effectuer des économies d'énergie immédiates (Encadré 9).

12 - <https://www.nuitfrance.fr/?page=extinctions>

Économies d'énergie grâce à l'extinction nocturne

Dans le Parc naturel régional de la Haute Vallée de Chevreuse, les communes bénéficient d'un accompagnement technique et financier du Parc pour réduire leur consommation énergétique et la pollution lumineuse. Le suivi mené par le Parc permet d'estimer les économies d'énergie engagées. Exemple sur deux communes :

- la commune du Mesnil-Saint-Denis a procédé à la rénovation de ses lanternes et à la mise en place de l'extinction en cœur de nuit grâce à l'installation d'horloges astronomiques. Cela a permis de générer, entre 2012 et 2017, une économie annuelle moyenne de 36 000 € ;
- la commune des Mesnuls a quant à elle converti une centaine de lampadaires en Sodium basse pression et instauré une extinction de l'éclairage public durant 5 h toutes les nuits. L'économie réalisée est d'environ 25 % de ses dépenses annuelles en électricité. La commune envisage d'étendre la durée d'extinction.

■ Quels freins à cette mesure ?

Un frein à la mise en place de l'extinction de l'éclairage public en cœur de nuit peut être la crainte de responsabilité de la part des élus en cas d'accident (accident de la route, vol, etc.). Le maire est en effet la seule autorité compétente en matière d'allumage et d'extinction de l'éclairage public. Les textes ne lui imposent cependant pas d'éclairer. Pour autant, il a obligation de ne pas mettre en danger la vie d'autrui (code pénal, article 121-3) y compris par négligence (code civil, art. 1383). Sa responsabilité peut donc être engagée en cas d'accident sur la voirie lié à un éclairage défaillant. Mais aucune jurisprudence ne met en cause la responsabilité des maires en cas d'accident de la route intervenu lors de temporisation volontaire et annoncée de l'éclairage public.

Il existe un sentiment d'insécurité lié au rapport ancestraux des humains à l'obscurité (peur du noir) [98,99]. Cependant, une revue systématique montre que l'éclairage de rue ne diminue pas la peur de la criminalité [100]. Aussi, une étude scientifique scientifique met en évidence que les différents scénarios d'éclairage (extinction, diminution des puissances, éclairage plein) ne font pas varier le taux de criminalité [101].

■ Comment la mettre en œuvre ?

Les principales étapes de mise en œuvre de la démarche d'extinction sont les suivantes :

Étape 1 - Analyse technique et financière

La commune, l'intercommunalité ou le syndicat d'énergie le cas échéant à la demande de la collectivité, procède à l'étude technique de la zone à éteindre. Il s'agit de vérifier l'état des armoires de commande et de faire le bilan des lampadaires existants. L'extinction de la zone peut nécessiter l'installation d'une **horloge astronomique*** sur chaque armoire.

La collectivité ou le syndicat établit un devis pour l'éventuelle rénovation du matériel, l'installation des horloges astronomiques nécessaires et pour les éventuels frais de câblage. L'étude permet également d'estimer les économies d'énergie engendrées par l'extinction. Le projet pourra bénéficier de crédits dans le cadre des certificats d'économie d'énergie ou d'une subvention par exemple de la Région ou d'un parc naturel régional s'il en existe un.

Étape 2 - Sensibilisation et concertation avec les habitants

Il est fortement conseillé d'associer la population, pour décider de la mise en place de cette mesure et de ses modalités (horaires, jours, etc.). Sur la base des éléments de l'étude, la collectivité peut entamer ce travail de sensibilisation, d'information et de concertation : articles dans le bulletin communal ou sur le site internet, organisation d'ateliers, de réunions publiques. Il est important de prendre en compte les usages de l'espace public par les habitants pour adapter les horaires d'extinctions (accès aux transports en commun, gare, arrêt de bus, livraisons, etc.).

Certaines communes ont pu mobiliser la gendarmerie pour rassurer les habitants sur l'absence de risques du point de vue de la sécurité des biens et des personnes liée à l'extinction. Des naturalistes, des astronomes amateurs, voire des médecins (sur l'impact de la lumière sur la santé), peuvent également venir témoigner de l'intérêt de la démarche. Cela peut prendre la forme de conférences publiques ou de sorties nocturnes.

Étape 3 - Délibération du conseil municipal et arrêté du maire

Tout changement dans les horaires de fonctionnement de l'éclairage public doit faire l'objet d'une délibération du conseil municipal et d'un arrêté du maire. **L'annexe 2 présente un modèle d'arrêté.**

Étape 4 - Information de la population

Une fois que la décision d'extinction est prise, il convient d'informer les habitants via le bulletin municipal, le site internet, la presse locale et de nouvelles réunions publiques.

Étape 5 - Réalisation des travaux

La collectivité ou le syndicat d'énergie, via l'entreprise en charge de la maintenance, procède aux travaux éventuels et à la programmation de l'extinction.

Étape 6 - Pose de la signalisation

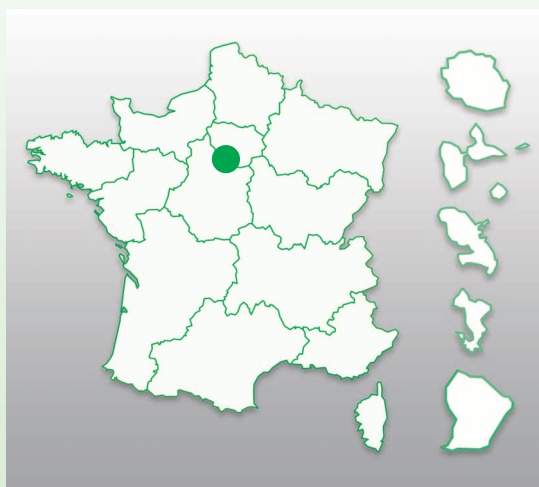
La pose d'un **panneau de signalisation « extinction de l'éclairage public »** lisible et clair est fortement conseillée (mais pas obligatoire) pour avertir les automobilistes que l'éclairage public est éteint sur certaines tranches horaires [102]. Si l'ensemble de son territoire est concerné, un panneau sera posé à chaque entrée de la commune, sinon, à l'entrée de chaque zone de la commune où l'extinction est pratiquée. Il n'existe pas de modèle certifié à appliquer pour ce panneau, sur sa forme, sa taille et le graphisme. Certains syndicats d'énergie peuvent cependant fournir un modèle local. En revanche, il n'est pas autorisé de le fixer sur un panneau normé du code de la route tel que le panneau d'entrée d'agglomération.

La signalisation peut être complétée par des bandes et des plots réfléchissants et par le traitement d'éventuels éléments fixes dangereux en bord de route en lien avec le gestionnaire de voirie (commune, intercommunalité, Département).

L'extinction peut alors être mise en œuvre.



Extinction nocturne dans le Parc naturel régional du Gâtinais français



Porteur de projet

PNR du Gâtinais français et communes du territoire

Partenaire

MNHN

Contact

Lucie Gandon - L.Gandon@parc-gatinais-francais.fr

Territoire rural situé en Île-de-France, le Parc du Gâtinais français est bordé d'agglomérations qui génèrent une importante pollution lumineuse. Il pâtit également du halo lumineux provenant de l'agglomération parisienne.

Dès la création du Parc en 1999, les élus se sont questionnés sur les incidences que l'éclairage extérieur pouvait avoir sur la biodiversité nocturne. Une étude, menée sur un petit village en 2002, a permis de montrer l'incidence de l'éclairage public sur les cortèges d'insectes et en particulier les papillons de nuit. Le Parc travaillant également pour la préservation des chauves-souris et des chouettes, l'enjeu de la préservation de l'environnement nocturne s'est très rapidement imposé.

Le Parc s'est ainsi lancé dans des actions de sensibilisation auprès du grand public via des conférences, des réunions publiques, des événements tels la Nuit de la Chouette ou le Jour de la Nuit, des articles dans son journal, afin d'attirer l'attention sur la problématique de la pollution lumineuse. Il a commencé à recenser les communes qui éteignaient leur éclairage public une partie de la nuit, et à travailler sur un cahier des charges afin de subventionner des rénovations d'éclairage public exemplaires.

Des étudiants du Muséum national d'Histoire naturelle ont réalisé des études sur l'impact de la lumière artificielle sur les différentes espèces de chauves-souris (2 masters et une thèse). Les résultats ont largement contribué à convaincre les élus et les habitants de l'intérêt d'un éclairage sobre et non permanent pour préserver la faune nocturne. À cet argument se sont ajoutés celui des économies financières générées par de telles pratiques et celui de la redécouverte du ciel étoilé. Le Parc a donc décidé en 2012 de conditionner ses aides financières aux communes pour les travaux de rénovation des équipements d'éclairage public à la pratique de l'extinction minimum 5h par nuit toute l'année. Le nombre de communes pratiquant l'extinction 5h par nuit est passé de 28 en 2011 à 59 fin 2016.

Depuis 2016, ce critère d'éco-conditionnalité est renforcé : seules les communes qui éteignent au minimum 5h par nuit toute l'année peuvent bénéficier de subventions du Parc, et ce quel que soit le domaine (rénovation du patrimoine, travaux paysagers, rénovation énergétique, tourisme, etc.). Ainsi fin 2019, 66 sur 69 communes éteignent entre 5h et 8h par nuit toute l'année :

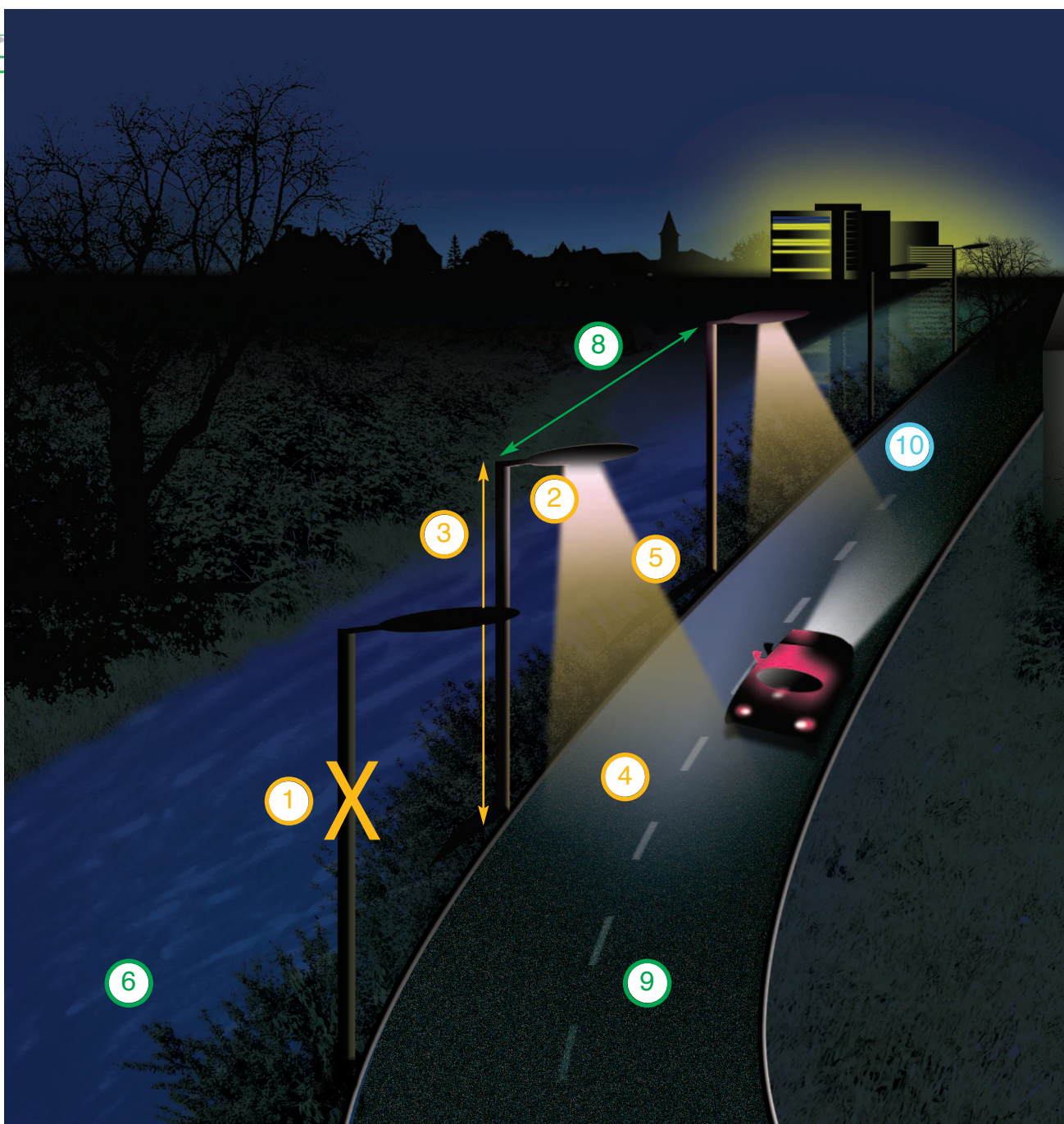
- 27 éteignent 5h par nuit ;
- 35 éteignent entre 5h15 et 7h par nuit ;
- 4 éteignent entre 7h15 et 8h par nuit.

Ensemble, ces communes divisent par deux la durée annuelle de fonctionnement de l'éclairage public. En effet, une extinction de 6 h par nuit permet d'économiser 2 200 heures d'éclairage par an, générant une réduction des consommations d'électricité d'environ 40 % et une réduction du coût d'environ 35 % (hors abonnement et en tenant compte de l'augmentation du prix de l'électricité).

À ces économies s'ajoutent les extinctions estivales totales pratiquées par certaines communes : leur éclairage public reste totalement éteint entre mi-mai et mi-août. En effet, durant cette période il fait jour très tard. L'éclairage fonctionnerait très peu avant d'être éteint, ce qui serait finalement préjudiciable pour le matériel. Il en va de même pour l'allumage le matin. Afin d'encourager cette pratique, le Parc attribue un bonus de 5 % aux subventions apportées aux communes qui s'engagent à expérimenter l'extinction totale en été. Ainsi en 3 ans seulement, 27 communes se sont engagées dans l'extinction totale en période estivale. Aucune commune n'a jamais rallumé, et les élus affirment n'avoir eu aucune difficulté à mettre en place l'extinction, y compris l'extinction totale en été. Progressivement, certaines communes rallongent leur plage d'extinction lorsqu'aucune activité humaine ne justifie d'éclairer.

Synthèse des recommandations sur la gestion de l'éclairage nocturne dans les continuités écologiques

Figure 32



Synthèse des différents axes de gestion de l'éclairage artificiel dans les continuités écologiques. Exemple de l'éclairage d'une rue.
Source : d'après Sordello, 2018 [46].

Caractéristiques des luminaires

- 1- Éviter ou supprimer les lampadaires inutiles
- 2- Angle d'orientation : ne diffuser aucune lumière au-dessus de l'horizontale
- 3- Hauteur des mâts : les plus bas possible pour diminuer leur repérage de loin par la faune
- 4- Éclairer strictement la surface utile au sol
- 5- Lumière émise : émettre une quantité de lumière la plus faible possible, au spectre le plus restreint possible et situé dans l'ombre, réduire au maximum l'éblouissement pour la faune

Organisation spatiale des points lumineux

- 6- Ne pas éclairer les cours d'eau
- 7- Ne pas éclairer les espaces naturels adjacents
- 8- Distance entre les lampadaires : maintenir des espaces interstitiels sombres pour les traversées de la faune
- 9- Revêtement du sol avec un faible coefficient de réflexion sous les éclairages



Illustration Béatrice Saurel pour OFB

7

Dimension temporelle

10- Détecteurs de présence

Temporalité réduite au minimum : Heure d'allumage, heure d'extinction, durée d'allumage, variation dans l'année

Rappelons que d'après :

- l'arrêté ministériel de décembre 2018, « les émissions de lumière artificielle des installations d'éclairage extérieur et des éclairages intérieurs émis vers l'extérieur sont conçues de manière à prévenir, limiter et réduire les nuisances lumineuses, notamment (...) à la faune, à la flore ou aux écosystèmes » ;
- l'article L371-1 du code de l'environnement, la TVB doit désormais tenir compte de « la gestion de la lumière artificielle la nuit » ;
- les orientations nationales Trame verte et bleue, la TVB doit préserver « de la pollution lumineuse les continuités écologiques ».

Une démarche proactive de maintien et de restauration de l'obscurité doit donc être mise en place partout. Cela passe en premier lieu par une sobriété de l'éclairage qui ne se limite pas à une sobriété énergétique. Au sein et en direction des continuités écologiques, mais de manière générale pour tout espace naturel, cette démarche consiste notamment à :

- éviter l'implantation d'éclairage ;
- supprimer au maximum les points lumineux ;
- favoriser les éclairages passifs (bandes et plots réfléchissants, catadioptrés, etc.).

Certaines activités humaines particulières peuvent justifier exceptionnellement la présence d'éclairage au sein des continuités écologiques. Les caractéristiques et le fonctionnement des points lumineux devraient alors intégrer, au-delà du respect de la réglementation, l'ensemble des considérations suivantes :

- avoir une temporalité réduite au minimum, strictement nécessaire à l'activité humaine concernée, grâce à une démarche d'extinction et/ou de détecteurs de présence, et tenant compte des rythmes de la biodiversité nocturne (quotidiens, saisonniers, pluriannuels) ;
- ne diffuser aucune lumière au-dessus de l'horizontale et réduire le « cône » de diffusion de la lumière pour limiter les flux proches de l'horizontale ;
- éclairer strictement la surface utile au sol (par exemple le cheminement) ;
- ne pas éclairer directement les surfaces aquatiques comme le demande la réglementation mais aussi plus largement tout milieu naturel et habitat pour la biodiversité (végétation, arbres, cavités, etc.) ;
- émettre une quantité de lumière la plus faible possible ;
- produire une lumière au spectre le plus restreint possible et situé dans l'ambre (éclairage à vapeur de Sodium basse pression ou à vapeur de Sodium haute pression ou LED orangée/ambrée) ;
- ne créer aucun risque d'éblouissement pour la faune.

Ces préconisations peuvent s'appliquer aussi bien pour des éclairages privés que publics et quelle que soit la catégorie d'usage de l'éclairage (à ce titre, voir la Figure 32 pour l'exemple de l'éclairage d'une rue). Ces mesures peuvent aussi être appliquées et modulées en dehors des continuités écologiques dans le cadre d'une gestion différenciée de l'éclairage.



5 – Outils et moyens

Différents outils peuvent être mobilisés par les collectivités territoriales en faveur de la Trame noire :

- les outils de planification de l'éclairage comme les Schémas directeurs d'éclairage ;
- les documents d'urbanisme, à travers les Schémas de cohérence territoriale et les Plans locaux d'urbanisme ;
- les démarches d'inventaire et de connaissance comme les Atlas de la biodiversité communale ;
- les outils contractuels à l'attention des acteurs privés ;
- les actions de sensibilisation du public et de valorisation.

Urbanisme lumière : Schéma directeur d'éclairage

Il est utile, voire nécessaire, pour une collectivité de planifier sa stratégie en matière d'éclairage urbain à travers un document cadre qui fixe les orientations concernant l'évolution du parc d'éclairage et des ambiances nocturnes sur son territoire en adéquation avec l'évolution des besoins et des enjeux territoriaux. C'est l'objet du Schéma directeur d'éclairage (SDE). Ce document non réglementaire d'initiative locale permet ainsi de faire des préconisations de bonnes pratiques, sur les niveaux lumineux attendus en réponse à un besoin pour les usagers, mais aussi en termes de typologies de lumière (ex : spectres), de choix technologiques, de modulation temporelle et saisonnière de ces niveaux, etc.

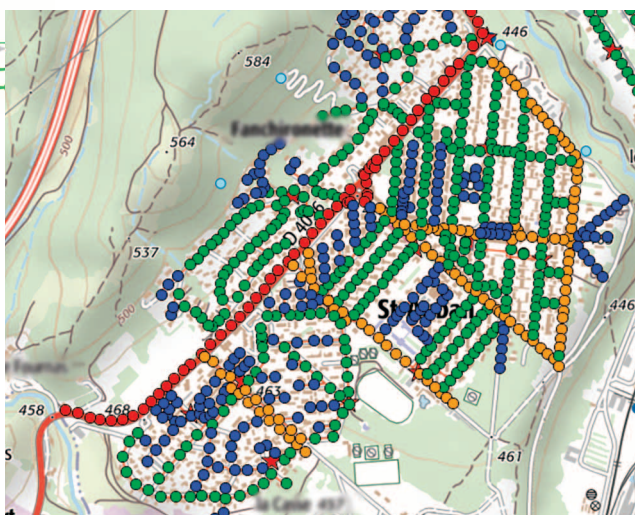
Ce document a pour objectifs :

- dans le cadre de diagnostics de performance en éclairage, d'évaluer le niveau de service du parc de la collectivité en comparant les performances mesurées en éclairage avec les objectifs fixés. Ainsi, il est possible de cerner les secteurs en sous-performance (à rénover) et ceux en sur-performance et donc en sur-éclairage (réduction des puissances à mettre en œuvre pour économies d'énergie) ;
- de définir des niveaux d'exigences lumineuses sur les espaces et voies publiques, de manière à ce que tous les projets d'éclairage, neufs ou en rénovation, soient dimensionnés en ciblant ces exigences ;
- de planifier dans le temps (sur une nuit, une semaine, une saison, une année) les évolutions de ces exigences en prenant en compte la fluctuation des besoins des usagers en lumière artificielle nocturne et en y intégrant éventuellement une réflexion sur l'extinction ;
- de croiser les besoins identifiés en matière d'apport d'éclairage artificiel avec les enjeux territoriaux autour de la préservation de la biodiversité (zones naturelles, continuités écologiques, secteurs protégés, etc.) et la préservation de la qualité du ciel nocturne, notamment autour des observatoires.

Le SDE peut être constitué d'une cartographie SIG à l'échelle du territoire croisant l'ensemble des informations et hiérarchisant les espaces, leurs enjeux, les exigences lumineuses et leur évolution temporelle. L'échelle intercommunale semble la plus appropriée pour une meilleure prise en compte de la majorité de ces enjeux qui dépassent très souvent les limites administratives communales. Son élaboration nécessite 3 à 4 jours de travail et son coût est de l'ordre de 3 000 €.

Le Schéma directeur d'aménagement lumière (SDAL) est quant à lui un document cadre plus ambitieux dans ses objectifs. Il nécessite une étude de plusieurs semaines intégrant les volets sociologique, économique, mise en lumière, etc. Son coût est donc de l'ordre de quelques dizaines de milliers d'euros.

Notons qu'il existe aussi des Plans lumière dont l'objectif est essentiellement la mise en valeur du patrimoine par l'éclairage.



- Classe d'éclairage 20 lux
- Classe d'éclairage 15 lux
- Classe d'éclairage 10 lux
- Classe d'éclairage 7.5 lux
- ★ Armoires de commande EP
- Réseaux Électrique EP

Extrait cartographique d'un SDE calé sur la hiérarchisation des besoins sur les espaces et voies publics. Source : Cerema.

En résumé, le SDE ou le SDAL constituent des outils privilégiés pour définir les modalités de gestion de l'éclairage public, ce qui peut servir tout particulièrement à proximité et au sein des continuités écologiques identifiées. Au-delà d'ajuster l'éclairage au besoin humain, le SDAL peut aussi intégrer plus clairement un volet environnemental fixant des objectifs proactifs de préservation de la biodiversité nocturne. Ainsi, c'est à travers son SDAL que la métropole de Rennes a intégré dès 2013 l'identification et la préservation d'une Trame noire (constituant la première expérience de Trame noire répertoriée).

Documents d'urbanisme

Les documents d'urbanisme - Schéma de cohérence territoriale (Scot), Plan local d'urbanisme (PLU), PLU intercommunal (PLUi)¹³ – sont tenus de répondre à l'objectif de préservation et de remise en bon état des continuités écologiques (Art. L.101-2 du code de l'urbanisme). À l'occasion de leur élaboration ou de leur révision, il est donc souhaitable de mener des études pour mieux connaître la TVB du territoire. Ces études permettent d'identifier la manière dont le document d'urbanisme doit prendre en compte les continuités écologiques et d'étayer les choix réalisés dans les outils de l'urbanisme mobilisés. Or, comme nous l'avons vu dans la partie A, la TVB doit prendre en considération la gestion de la lumière artificielle la nuit (Art. L.371-1 du code de l'environnement). Dès lors que les études réalisées identifient des enjeux de biodiversité nocturne, cela justifie la nécessité de prendre des mesures en faveur de la Trame noire dans le document d'urbanisme. Dans le cadre de la révision de son Scot, le Syndicat mixte du Scot des Vosges centrales a mené une étude pour identifier la Trame noire de son territoire (Retour d'expérience 10).

Les différentes parties constitutives des Scot et des PLU(i) peuvent intégrer l'enjeu de la Trame noire et de la biodiversité nocturne¹⁴.

■ Rapport de présentation du Scot et du PLU(i)

Le rapport de présentation, première pièce constitutive du Scot et du PLU(i), présente notamment le diagnostic du territoire concerné. Ce diagnostic traite entre autres des enjeux répertoriés en matière d'environnement, et notamment de biodiversité. Il s'agit d'analyser l'état initial de l'environnement et les perspectives de son évolution en exposant, notamment, les caractéristiques des zones susceptibles d'être touchées de manière notable par la mise en œuvre de ce document d'urbanisme.

Scot et PLU(i) doivent également expliquer dans ce rapport comment ont été retenus les choix du projet, et exposer la manière dont ils prennent en compte la préservation et la mise en valeur de l'environnement. Au titre de l'évaluation environnementale, il s'agit plus particulièrement d'analyser les incidences notables prévisibles de la mise en œuvre du Scot ou du PLU(i) (soumis à évaluation environnementale) sur l'environnement, d'expliquer les raisons qui justifient le choix opéré au regard des solutions de substitution raisonnables, et de présenter les mesures envisagées pour éviter, réduire et, si possible, compenser (ERC) s'il y a lieu, les consé-

¹³ - Pour faciliter la lecture, l'indication PLU(i) utilisée par la suite englobe PLU et PLUi.

¹⁴ - Remarque : la prise en compte des enjeux de biodiversité nocturne dans les Scot et PLU est encore très récente et donc assez rare. Il est proposé ici une lecture assez volontariste du code de l'urbanisme et des moyens qu'il nous semble proposer pour agir sur le sujet ; il ne peut cependant être garanti que le juge souscrira à cette interprétation en cas de contentieux sur le document d'urbanisme.

quences dommageables de la mise en œuvre du schéma sur l'environnement. Il est important, pour réaliser un état initial correct et pour proposer des mesures ERC adaptées, de mener un état des lieux, et, le cas échéant, de compléter les connaissances relatives à la biodiversité nocturne et à la Trame noire du territoire. Des inventaires spécifiques peuvent donc être menés sur les chiroptères, hétérocères (papillons de nuit), lucioles, oiseaux nocturnes, mammifères terrestres, etc.

Le rapport de présentation constitue une opportunité pour appréhender les enjeux liés à la biodiversité nocturne, pour objectiver les impacts du document d'urbanisme sur l'environnement, y compris ceux générés par l'éclairage artificiel induit par ce projet d'aménagement du territoire. Il constituera la base justifiant les mesures prises en faveur de la Trame noire dans les autres parties constitutives du document d'urbanisme.

■ **Projet d'aménagement et de développement durable (PADD) du Scot et du PLU(i)**

Dès lors que le rapport de présentation identifie des enjeux de préservation et de restauration des continuités écologiques, il est important d'inclure dans le PADD des orientations générales pour lutter contre la pollution lumineuse et d'identifier des secteurs où l'obscurité doit être maintenue ou restaurée, et donc la Trame noire.

■ **Orientations d'aménagement et de programmation (OAP) du PLU(i)**

Les OAP permettent de définir des prescriptions avec lesquelles les projets d'aménagement doivent être compatibles. Elles peuvent être réalisées sur un sujet particulier (OAP thématique) ou à l'échelle d'un secteur ayant vocation à accueillir un projet d'aménagement ou de renouvellement urbain (OAP de secteur). Ces dernières sont obligatoires pour l'ouverture d'une zone à l'urbanisation (zone AU) dans le PLU(i).

Une **OAP thématique « biodiversité »** ou **« Trame verte et bleue »** peut concerner une partie ou la totalité du territoire. Cet outil permet de mettre en exergue des sujets considérés comme importants dans le projet de territoire. L'OAP peut permettre, en complément des autres enjeux biodiversité, de cartographier et de détailler les zones nécessitant une gestion particulière de l'éclairage compte tenu des enjeux identifiés de continuités écologiques pour des espèces nocturnes (par exemple présence d'une colonie de chauves-souris). Elle pourra donc être assortie de recommandations très précises pour limiter l'éclairage. Cette OAP thématique « biodiversité » ou « TVB » peut identifier des zones prioritaires faisant l'objet d'OAP de secteur.

Une **OAP de secteur** spatialise et prépare la mise en œuvre opérationnelle des objectifs du PADD à l'échelle d'un secteur d'aménagement déterminé. En complément d'une OAP thématique « biodiversité », une OAP sur un secteur présentant des enjeux particuliers pour la Trame noire peut ainsi fixer certaines orientations d'aménagement, en indiquant par exemple un nombre maximum de réverbères sur l'ensemble du projet d'aménagement. Les OAP peuvent faire des préconisations sur la gestion de l'éclairage en lien avec la Trame noire et se référer à une annexe ou un guide plus complet (Annexes et documents périphériques).

Les OAP peuvent édicter des principes de traitement de voies ou d'espaces publics, qui peuvent éventuellement être complétés d'un SDE.

■ **Document d'orientations et d'objectifs (DOO) du Scot**

Le DOO est le document du Scot qui permet de mettre en œuvre les orientations générales du PADD. Il détermine les orientations générales de l'organisation de l'espace et les grands équilibres entre les espaces urbains et à aménager et les espaces naturels, forestiers et agricoles. Le DOO est une pièce opposable, notamment aux PLU(i) qui doivent être compatibles avec les orientations énoncées dans ce document. Le Scot des Vosges centrales a intégré dans son DOO des orientations en faveur de la Trame noire.

■ **Règlement du PLU(i)**

Les préconisations du PADD peuvent être reprises dans l'article **« voirie et réseaux divers (VRD) »** du **règlement de chaque zone**, qui comprend également l'éclairage public.

Le code de l'urbanisme inclut aussi des articles qui permettent d'intervenir sur le sujet de la pollution lumineuse dans le règlement du PLU(i) par plusieurs entrées thématiques :

Sites et secteurs « continuités écologiques » : l'article L.113-29 du code de l'urbanisme permet de **classer en espaces de continuités écologiques** des éléments de la Trame verte et bleue. Ce classement permet la mise en place d'un règlement spécifique dont les dispositions visent une remise en état de la TVB. Ce règlement peut

par exemple viser une qualité d'éclairage minimale à respecter en termes d'impacts sur la biodiversité (température de couleur, orientation et puissance du flux, etc.), qui peut évoluer dans le temps en fonction de l'avancée des connaissances et des technologies sur le marché, voire des autres réglementations s'intéressant à ce sujet.

L'article L.151-23 indique que : « Le règlement peut (...) **délimiter les sites et secteurs à protéger** pour des motifs d'ordre écologique, notamment pour la préservation, le maintien ou la remise en état des continuités écologiques et définir, le cas échéant, les prescriptions de nature à assurer leur préservation. (...) **Il peut localiser, dans les zones urbaines, les terrains cultivés et les espaces non bâtis nécessaires** au maintien des continuités écologiques à protéger et inconstructibles quels que soient les équipements qui, le cas échéant, les desservent. »

D'après l'article L.151-41, « le règlement peut aussi délimiter des terrains sur lesquels sont institués (...) des **emplacements réservés** (...) aux espaces nécessaires aux continuités écologiques (...) ». **La collectivité peut mobiliser cet outil pour acquérir des terrains** inclus dans une continuité écologique qu'elle souhaite maintenir ou restaurer. La mise en place d'emplacements réservés « continuités écologiques nocturnes » devra trouver sa justification dans le rapport de présentation, qui aura identifié sur ces secteurs des enjeux spécifiques à la biodiversité nocturne, et dans le PADD qui aura donné des orientations en ce sens.

Secteurs de « préservation des ressources naturelles » : l'article R.151-31 prévoit que « Dans les zones U, AU, A et N, les documents graphiques du règlement font apparaître, s'il y a lieu », les secteurs où « les nécessités (...) de la préservation des ressources naturelles (...) justifient que soient interdites les constructions et installations de toute nature, permanentes ou non (...) ». L'article R.151-34 reprend les mêmes éléments mais en permettant ici « que soient soumises à des conditions spéciales les constructions et installations de toute nature, permanentes ou non (...) ». On pourra ici viser la préservation d'une ressource naturelle exploitée par l'homme (gibier, ressource halieutique par ex.) sensible à l'éclairage artificiel. Certains poissons migrateurs (saumons, anguilles) sont par exemple impactés par l'éclairage des cours d'eau.

Secteurs de « performance environnementale » : le PLU(i) peut délimiter des secteurs dans lesquels le règlement « impose aux constructions, travaux, installations et aménagements de respecter des performances environnementales renforcées qu'il définit » (article L.151-21) ; les performances énergétiques et environnementales ciblées devront ici concerner en premier chef les caractéristiques de l'installation d'éclairage en termes d'efficacité énergétique, mais pourraient également s'intéresser à la question de son impact sur la biodiversité, les éclairages les plus efficaces à ce jour en termes énergétiques n'étant pas les plus adaptés en termes d'impacts sur la biodiversité.

Ces dispositions indiquent donc qu'il est possible, de plusieurs manières différentes, d'intégrer dans le règlement du PLU(i) des prescriptions spécifiques à la préservation ou la remise en bon état des continuités écologiques sur les secteurs concernés. Cela peut alors inclure les continuités écologiques nocturnes. Le règlement peut ainsi imposer un certain nombre de critères d'aménagement contribuant au maintien ou à la restauration des trames noires, comme par exemple la nécessité d'adapter voire d'interdire toute source lumineuse sur la zone concernée. Ces prescriptions pourront le cas échéant être reprises dans le cadre de l'instruction des autorisations d'urbanisme.

■ Annexes et documents périphériques

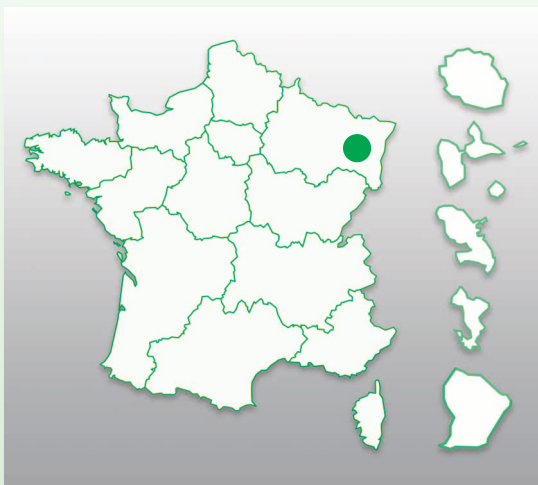
Il est possible d'annexer au PLU(i) des préconisations en matière d'éclairage extérieur, pour guider le choix des habitants et autres acteurs privés sur le territoire. La collectivité peut également produire et/ou diffuser des documents techniques non directement liés au document d'urbanisme comprenant des recommandations. Le Syndicat mixte du Scot des Vosges centrales a réalisé un guide sur la démarche de Trame noire développée sur le territoire.

■ Modernisation des Scot

L'ordonnance du 17 juin 2020 relative à la modernisation des Scot modifie sensiblement leur contenu. Les recommandations précédentes s'appliquent aux Scot dont l'élaboration ou la révision a été engagée avant le 1^{er} avril 2021. Elles peuvent être transposées et adaptées à la nouvelle génération de Scot engagés après cette date. Pour ces derniers :

- le rapport de présentation disparaît et son contenu est renvoyé en annexe ;
- le Plan d'action stratégique (PAS) se substitue au PADD ;
- un programme d'action peut être annexé.

Trame noire dans le Scot des Vosges centrales



Porteur de projet

Syndicat mixte du Scot des Vosges centrales

Partenaires

Trois bureaux d'étude : L'Atelier des Territoires, (spécialisé en environnement), Acere (expert en éclairagisme) et DarkSkyLab (spécialisé dans l'analyse de la pollution lumineuse).

Coût global

Volet Trame noire du Scot : 45 000 €

Contact

Jacques Grondahl - syndicat@scot-vosges-centrales.fr

Le Scot des Vosges centrales couvre 154 communes, et ce territoire centré sur la ville d'Épinal compte plus de 130 000 habitants. Dans le cadre de sa révision, les élus ont souhaité en 2018 compléter la TVB, déjà bien définie, par une Trame noire. Deux-tiers des communes du territoire pratiquaient déjà l'extinction de l'éclairage public, dont Epinal (ville de 30 000 habitants) depuis 2015. La démarche portait sur une généralisation de ces pratiques à l'ensemble des communes du territoire. S'engager dans une démarche de Trame noire avait pour objectif d'apporter un argumentaire complémentaire à la réduction des dépenses publiques pour justifier les mesures d'extinction et de réduction de l'éclairage public.

L'étude a mobilisé les méthodes suivantes : sur les zones très urbanisées, le Syndicat départemental d'électricité des Vosges a fourni la cartographie détaillée des points lumineux, des données de consommation au niveau communal fournies par Enedis, des données d'extinction de l'éclairage public obtenues par sondage auprès des communes, de statistiques sur les populations ou des radiances mesurées par satellite. Les cartes réalisées, calibrées par l'ensemble des mesures de luminosité nocturne réalisées en 97 points du territoire, ont permis d'analyser finement la pollution lumineuse à différentes heures de la nuit et pour différentes conditions météorologiques.

Cette cartographie a mis en évidence un ciel remarquablement sombre dans la partie sud-est du territoire, alors que la pollution lumineuse reste élevée dans la vallée de la Moselle, là où se concentrent les industries, les zones commerciales et les secteurs d'habitat.

La cartographie a été croisée avec les données relevées sur le terrain et les données de la TVB, réservoirs de biodiversité (grands massifs forestiers, secteurs de vergers traditionnels, vallée de la Moselle, anciens forts, centre de village avec bâti ancien...) et corridors écologiques fréquentés par des espèces sensibles à la lumière (chiroptères, oiseaux, amphibiens notamment). Ce travail a ainsi conduit à la cartographie de la Trame noire (Figure 33) : réservoirs et corridors écologiques fonctionnels pour les espèces nocturnes et ceux dont la fonctionnalité est perturbée par la pollution lumineuse.

Lors de sa nouvelle révision pour élargir son périmètre au dernier schéma intercommunal, le Scot a pleinement intégré la Trame noire, en tant que nouvelle composante de la TVB. Le DOO du Scot révisé fixe ainsi les orientations suivantes :

A/ Identifier et limiter les zones de conflit entre les réservoirs de biodiversité définis dans la Trame verte et bleue et l'éclairage nocturne ;

B/ Identifier et rétablir autant que possible les corridors écologiques dysfonctionnels la nuit du fait de l'éclairage nocturne, perturbant les déplacements des espèces du fait de l'attraction ou de la répulsion des espèces aux sources lumineuses ;

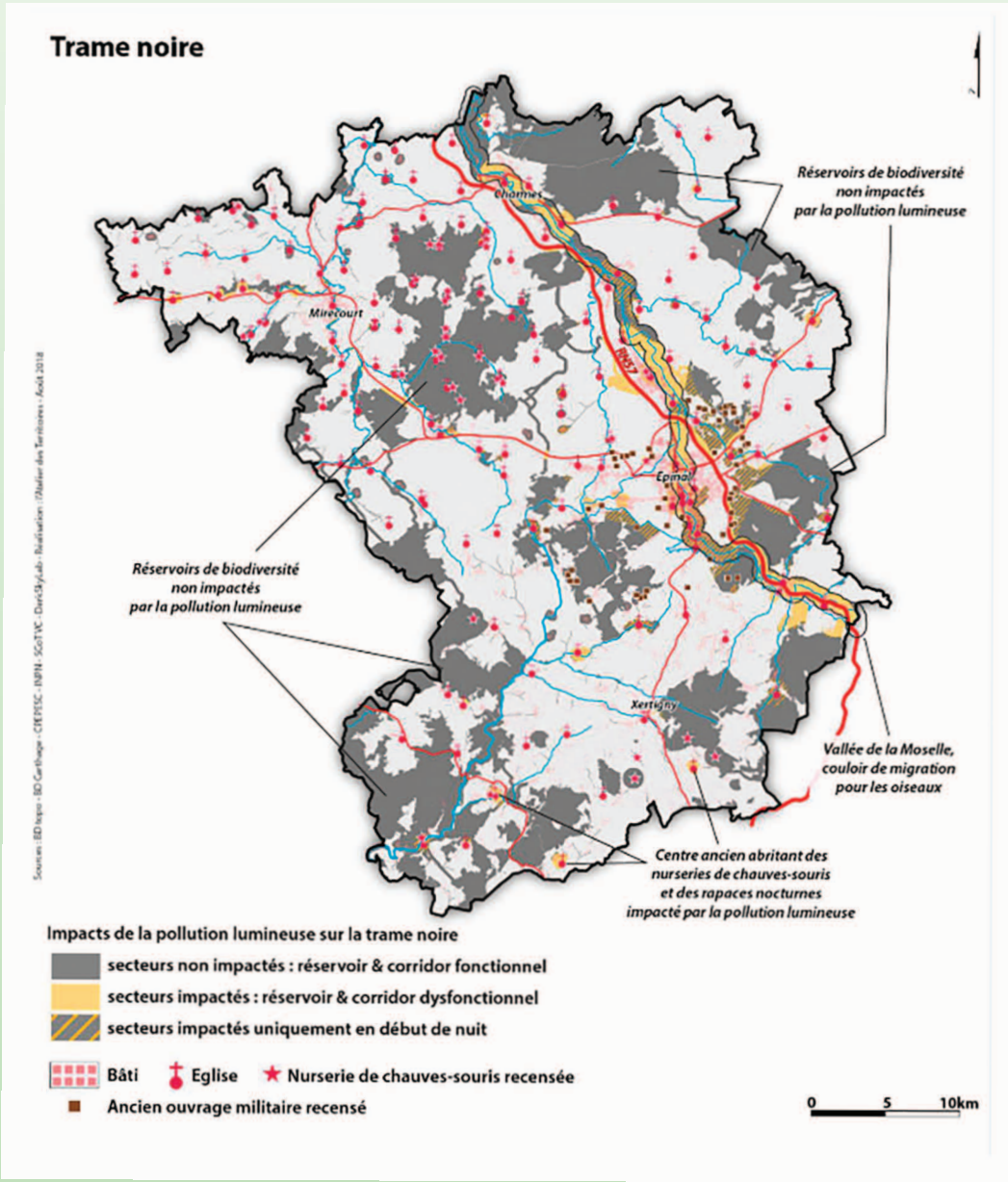
C/ Prévoir des mesures d'ajustement de l'éclairage nocturne lorsque cela est possible, en particulier pour les corridors peu fonctionnels d'intérêt régional ;

D/ Spécifier des mesures de prévention pour certaines espèces emblématiques spécifiquement impactées, comme les rapaces et les chiroptères, en prenant en compte l'heure du jour où l'activité de l'espèce est la plus intense.

Le Syndicat du Scot a élaboré un « Guide pour une sobriété de l'éclairage public dans les Vosges centrales » à l'attention des collectivités du territoire. Il comporte deux tomes : le premier pour identifier et décrire la Trame noire du territoire et le second pour proposer des solutions techniques pour sa mise en œuvre. Le territoire dispose en outre d'une charte d'engagement « Eclairer juste » destinée aux collectivités (voir page suivante).

En savoir plus : <http://www.scot-vosges-centrales.fr/>

Figure 33



Trame noire du territoire du Scot des Vosges centrales. Source : Syndicat mixte du Scot des Vosges centrales.

CHARTER « Éclairer juste »



Dans le cadre de la définition d'une *Trame Noire* sur son territoire, le Syndicat du SCOT des Vosges Centrales propose la présente charte en lien avec son guide :

Mettre en Lumière l'Univers de la Nuit.

Reprenant les principes du guide, la charte d'engagement « **Éclairer juste** » part des constats suivants sur l'éclairage public :

- La pollution lumineuse perturbe les écosystèmes, la biodiversité et la santé humaine ;
- Les collectivités ont des rôles et des devoirs à assumer en ce sens, car elles sont en partie responsables de la clarté de notre bien commun, le ciel étoilé, patrimoine de l'humanité ;
- L'éclairage public, partie visible de la politique énergétique territoriale, a une incidence sur les consommations d'énergie et le budget des collectivités ;
- L'éclairage public concourt à la qualité et à la sécurité des déplacements et agit sur les ambiances des paysages nocturnes du territoire.

« **Éclairer juste** » est la volonté d'une politique vertueuse d'éclairage public qui poursuit les objectifs suivants :

Éclairer uniquement lorsque c'est nécessaire.

Éclairer là où il faut, quand il le faut.

Adapter l'éclairage aux besoins.

La commune s'engage à :

Définir son projet d'éclairage public.

Elle doit s'interroger sur le besoin d'éclairer : pourquoi éclairer ? Quelle hiérarchie de l'éclairage ? Quels usages ? Plusieurs facteurs sont à appréhender afin de mettre en évidence les contraintes de circulation, de configuration des voies, de dangerosité, de nuisances lumineuses, de consommations électriques, de protection de l'environnement... Au regard de ces diverses analyses, le maire s'engage à éteindre l'éclairage public au moins une partie de la nuit.

Adopter une gestion différenciée de l'éclairage public par secteur.

L'éclairage public nécessite de se poser la question de l'usage des lieux, afin de garantir un service performant. La commune s'engage à appliquer une gestion différenciée en fonction des secteurs (y compris dans les zones privées) : habitat, tertiaire, zone d'activités, de loisirs...

Adopter des pratiques respectueuses de l'environnement.

Il convient de mettre en place des actions limitant les impacts négatifs de la pollution lumineuse autant sur la biodiversité et la santé humaine, sur les consommations d'énergie, que sur l'éclairage du ciel nocturne. L'analyse du cycle de vie des équipements et leur recyclabilité sont aussi des critères de sélection à prendre en compte pour « éclairer juste ».

Maîtriser le budget alloué à l'éclairage public.

Adopter une gestion responsable, plus efficiente dans la gestion des investissements et du coût de fonctionnement de l'éclairage public permet de participer à la maîtrise des budgets des collectivités. Un suivi des consommations devra être mis en place. Pour les investissements, une démarche d'achat responsable sera privilégiée.

La collectivité :

Date et signature :

Atlas de la biodiversité communale

Les Atlas de la biodiversité communale (ABC) permettent aux collectivités territoriales et aux intercommunalités de mieux connaître la biodiversité d'un territoire. Ils identifient les actions à mettre en œuvre pour mieux la protéger, la restaurer et la valoriser. Ces ABC doivent permettre à la collectivité de mieux intégrer la biodiversité dans ses différentes politiques publiques, notamment en matière d'urbanisation et d'aménagement du territoire.

Les ABC se déclinent autour d'un partenariat local composé d'élus, d'associations naturalistes, d'experts scientifiques, d'institutionnels et d'habitants. Ces derniers peuvent contribuer aux inventaires, à des actions de gestion des espaces publics et privés et de restauration de milieux naturels. Un guide national apporte un cadrage méthodologique et l'Office français de la biodiversité réalise des appels à projets.

En ce qui concerne la Trame noire, les ABC peuvent agir à deux niveaux :

■ pour son **identification grâce à un approfondissement des connaissances naturalistes et à la modélisation**, comme c'est déjà le cas pour la Trame verte et bleue. En développant les connaissances sur certaines espèces, mais aussi par des inventaires et une cartographie fine des habitats, les ABC peuvent alimenter la modélisation des continuités écologiques qui gagne alors en robustesse et en opérationnalité. La présence confirmée d'espèces nocturnes particulières peut alimenter la modélisation de la Trame noire.

À Nantes métropole en Loire-Atlantique (24 communes), un plan est en cours de réflexion avec l'appui à maîtrise d'ouvrage du Cerema. Les informations issues des données de trame écologique définies pour les chiroptères, les données issues des réseaux d'exploitation et des orthophotos nocturnes ont été croisées. Ces croisements donnent de précieuses informations permettant d'alimenter un futur plan d'action de gestion différenciée de l'éclairage par secteur et par quartier, en tenant compte des besoins des habitants, des usagers divers et des espèces animales.

■ en proposant des **mesures de gestion de l'éclairage nocturne** permettant ainsi de préserver et de restaurer la Trame noire. Ces mesures pour une gestion différenciée de l'éclairage peuvent couvrir les différents axes évoqués dans le présent guide (dimension temporelle, dimension spatiale, caractéristiques des sources lumineuses).

La commune de Saint-Lunaire en Ille-et-Vilaine a modernisé son éclairage public dans le cadre de la mise en œuvre de son ABC : la hauteur des candélabres a été abaissée de 8 à 6 mètres (hauteur stratégique pour certains oiseaux nocturnes) sur les nouvelles routes afin de diminuer l'impact de la diffusion du halo lumineux, le nombre de lampadaires a été réduit à un seul trottoir en excluant un éclairage de la voirie. Des horaires variables d'allumage/extinction ont également été décidés. La commune et ses habitants suivent aussi les populations de vers luisants, de papillons et d'oiseaux nocturnes afin d'évaluer l'impact de ces mesures.

Pour mettre en œuvre un Atlas, l'Office français de la biodiversité, l'Agence régionale de la biodiversité et la Région ou le Département peuvent apporter un appui technique et financier.

En savoir plus : <https://abc.naturefrance.fr>

● Outils contractuels avec les acteurs privés

Les acteurs privés peuvent être concernés par la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques nocturnes dans le cadre de leur activité. Pour engager ces acteurs dans la préservation et la restauration de la Trame noire, il est nécessaire de mobiliser les outils contractuels à disposition de la collectivité tels que :

- les conventions d'occupation et les autorisations d'occupation temporaire du domaine public ;
- les obligations réelles environnementales.

■ Autorisations d'occupation temporaire du domaine public

L'occupation du domaine public (trottoirs, places, plage, bord de fleuve, etc.) par un commerce doit répondre à des conditions fixées par l'autorité administrative qui est en charge de sa gestion, généralement la commune. Quand l'occupation concerne le domaine public maritime, sauf en cas de délégation, c'est la préfecture qui est l'autorité compétente en termes d'autorisation. Cette occupation nécessite une autorisation d'occupation temporaire (AOT) du domaine public, qui prend la forme d'un arrêté, et entraîne le paiement d'une redevance. Ainsi, les commerçants (restaurants, paillotes, bars...) qui occupent une partie du trottoir, mais également qui

exploitent la partie terrestre du domaine public maritime ou fluvial sont soumis à une autorisation administrative à durée limitée dans le temps.

Il est possible d'intégrer des prescriptions relatives à l'éclairage dans ces AOT, par exemple en interdisant tout dispositif d'éclairage orienté ou perceptible depuis la plage ou le lagon. Ces dispositions pourraient avantageusement être mobilisées sur les littoraux où de nombreux hôtels et restaurants disposent de terrasses à proximité du rivage, en vue de réduire les nuisances que les éclairages de ces sites génèrent sur l'interface terre-mer.

■ Obligations réelles environnementales (ORE)

Les obligations réelles environnementales (ORE) définies à l'article L.132-3 du code de l'environnement correspondent à des contrats librement consentis entre **le propriétaire** (public ou privé) **d'un bien immobilier** (terrain, bâtiment, etc.) et un cocontractant, qui peut être la collectivité (mairie, communauté de commune, métropole, etc.), un établissement public ou une personne morale de droit privé agissant pour la protection de l'environnement, comme une association de protection de la nature.

L'objet de ce contrat doit porter sur la protection de la biodiversité et des fonctions écologiques ; la préservation ou la restauration d'une continuité écologique nocturne rentre donc dans ce cadre. Dans ce contrat, le propriétaire du bien immobilier (ex. : une parcelle en bord de cours d'eau ou comprenant des arbres-gîtes, des mares accueillant la reproduction d'amphibiens, un vieux bâtiment accueillant une colonie de chauves-souris, etc.) s'engage sur des obligations actives (obligations de mener des actions) et/ou passives (obligation de ne pas réaliser certaines actions) qu'il appliquera sur son bien, en contrepartie d'engagements pris par le cocontractant (ex. : assistance technique/financière/matérielle), et d'une potentielle exonération de la part communale de la taxe sur le foncier non bâti (qui doit être votée par la commune du bien immobilier concerné).

La durée de ce contrat est librement définie et peut aller jusqu'à 99 ans. Il peut ainsi être proposé par la collectivité aux habitants possédant des terrains qui se situent dans une continuité écologique identifiée (par exemple dans le document d'urbanisme), et sur laquelle des opérations de préservation ou restauration pourraient être envisagées. Dans le cas de la Trame noire, il s'agirait d'engager une réflexion et des actions pour réduire l'impact de l'éclairage extérieur des jardins par exemple (réduction ou suppression du nombre de points lumineux, modification de l'orientation des luminaires, adaptation de la technologie employée, etc.).

La commune ou l'intercommunalité cocontractante pourrait porter assistance aux propriétaires concernés, via l'intervention des services espaces verts, du conseil technique, du suivi d'efficacité des actions, etc.

Une caractéristique intéressante de l'ORE est qu'elle est rattachée au bien immobilier, et non à la personne propriétaire : elle sera donc transmise aux héritiers ou aux futurs propriétaires du bien concerné, pendant la durée prévue par le contrat initial ; ceux-ci seront tenus de respecter les obligations souscrites initialement, dont ils seront informés par le notaire lors de l'achat ou de la succession.

L'ORE permet donc aux acteurs privés et publics de mener une action de long terme en faveur de l'environnement, et apparaît particulièrement adaptée pour mobiliser les propriétaires fonciers volontaires dans la mise en œuvre de la Trame noire.

En savoir plus : <https://bit.ly/3mJxguY>

Accéptabilité sociale de la Trame noire et mise en valeur de la nuit

La crainte ancestrale des humains vis-à-vis de l'obscurité peut être un frein à la mise en œuvre d'actions en faveur de la Trame noire et de réduction, voire d'extinction, de l'éclairage. Cela peut provoquer par anticipation une réticence des élus à intervenir sur le sujet, de peur de déplaire à leurs administrés. Une étude a été menée sur l'acceptabilité sociale de la Trame noire dans la métropole de Lille (Retour d'expérience 11). Il en ressort que les habitants ont une certaine connaissance de la biodiversité nocturne et ont donc conscience de la nécessité de la préserver.

■ Participer à des événements nationaux

D'une manière générale, il est important de mener des actions qui génèrent une vision positive de la nuit. Il existe des événements d'ampleur nationale ou internationale auxquels la collectivité peut s'associer tels que « Le Jour de la nuit », « La Nuit internationale de la chauve-souris » et « La Nuit de la chouette ».

Le « Jour de la Nuit » est une campagne nationale de sensibilisation des collectivités et des citoyens sur les nuisances lumineuses et l'environnement nocturne qui est organisée chaque année depuis 2009 par l'association Agir pour l'environnement. Cet événement a généralement lieu au mois d'octobre et permet de lier biodiversité nocturne, astronomie et maîtrise de l'énergie. À cette occasion, de nombreuses animations et activités sont proposées partout en France : conférences, expositions, sorties nature en soirée avec des naturalistes pour découvrir les chauves-souris et les rapaces nocturnes, écoute des animaux, observations des étoiles, découvertes de la biodiversité nocturne, etc. C'est également l'occasion de faire rêver les plus petits autour de contes véhiculant une image positive de la nuit et de ses habitants. Ces manifestations sont organisées chaque année sur tout le territoire national mobilisant notamment de nombreuses collectivités, des associations et des gestionnaires d'aires protégées. De nombreuses communes, aussi bien des villes que des villages, participent au « Jour de la nuit » en éteignant symboliquement tout ou partie de leur éclairage public ou de leur éclairage de mise en valeur du patrimoine.

Cet événement permet d'accompagner la mise en œuvre de la réglementation relative aux nuisances lumineuses et à la maîtrise des consommations d'énergie au travers d'une sensibilisation des différents publics (grand public, élus et professionnels) et invite notamment à réfléchir à un éclairage raisonné.



Affiche du jour de la nuit.

■ Accompagner la mise en œuvre d'actions

Dans la mise en œuvre de la Trame noire, par l'extinction de l'éclairage public en cœur de nuit ou la mise en place de LED ambrées par exemple, l'information et la communication avec les habitants est un facteur clé de réussite et de pérennisation des actions. Expliquer une action permet de la comprendre et ainsi de l'accepter. Site internet, bulletin municipal, articles dans la presse locale sont autant de moyens à mobiliser pour communiquer sur la biodiversité nocturne et sur les actions menées en faveur de sa préservation. Pour lutter contre les craintes en matière de sécurité et rassurer les habitants, l'organisation d'une réunion avec des gendarmes peut être un levier particulièrement efficace.

■ Villes et villages étoilés

Une autre approche, tout à fait complémentaire, est celle de la nuit étoilée. Nombreux sont les nostalgiques des ciels étoilés malheureusement aujourd'hui voilés par la pollution lumineuse dans les villes et à leur proximité en raison du halo qu'elles génèrent. Les astronomes amateurs mènent des actions de communication et sensibilisation sur le sujet.

Organisé tous les 2 ans par l'Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturne (ANPCEN), le concours « Villes et Villages étoilés » distingue les communes qui agissent pour la qualité de la nuit et de l'environnement nocturne, tant pour les humains que pour la biodiversité, afin de réduire la pollution lumineuse et de réduire les consommations d'énergie. Les actions remarquables donnent lieu à la remise d'un label comportant de une à cinq étoiles, valable 4 ans. Plusieurs centaines de communes ont ainsi été labellisées.

■ Réserves internationales de ciel étoilé

Le label « Réserves internationales de ciel étoilé » (RICE) est délivré par l'International dark-sky association (IDA)¹⁵ à de vastes territoires, ainsi reconnus pour la qualité de leur ciel nocturne et la visibilité des étoiles. La labellisation RICE s'appuie avant tout sur des mesures de la noirceur du ciel nocturne mais ces enjeux astronomiques recoupent une partie des enjeux de biodiversité soulevés par l'éclairage nocturne (usage du ciel étoilé par de nombreux animaux nocturnes). Cette labellisation s'accompagne nécessairement d'une communication et d'une sensibilisation dédiées. Elle valorise le territoire pour la qualité de son cadre de vie et son attrait touristique. En ce sens, le label RICE peut faciliter l'appropriation des enjeux liés à la biodiversité nocturne et à la Trame noire.

En France, il existe trois RICE :

■ **la RICE du Pic du Midi**¹⁶ créée en 2013, dont la zone cœur s'appuie sur les zonages de protection existants (zone cœur du Parc national des Pyrénées, Réserves naturelles du Néouvielle et d'Aulon) ;

■ **la RICE du Parc national des Cévennes**, classée en août 2018 et qui s'étend sur 36 000 km², constituant la RICE la plus vaste d'Europe ;

■ **la RICE Alpes Azur Mercantour**¹⁷, labellisée en décembre 2019, qui s'étend sur les territoires du Parc naturel régional des Préalpes d'Azur, de la Communauté de communes Alpes d'Azur et d'une partie du Parc national du Mercantour.

La volonté des territoires d'obtenir une reconnaissance de leurs efforts en matière de qualité du ciel nocturne par l'obtention d'une labellisation tend à se développer : d'autres parcs nationaux, des parcs naturels régionaux ou des intercommunalités ont, à leur tour, entamé une démarche pour demander la labellisation RICE. Ce sont autant de territoires où la Trame noire pourrait être déployée, de façon à intégrer pleinement les enjeux de biodiversité nocturne dans les actions menées contre la pollution lumineuse.

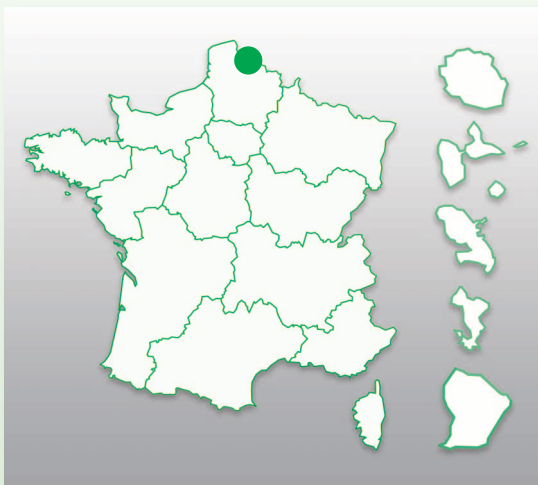
Cependant, ce label très exigeant n'est pas à la portée de tous les territoires, notamment de ceux qui, malgré leur exemplarité, restent impactés par le halo lumineux d'une agglomération proche et sur laquelle ils ne pourront pas intervenir. L'IDA a également créé en 2018 un label plus adapté à ces territoires péri-urbains : le programme « *Urban night sky places* ». Il permet de valoriser les efforts pour protéger un ciel nocturne obscur à proximité de lieux densément peuplés. Ce label a pour but de mettre en avant le rôle des paysages protégés urbains et, par ce biais, de sensibiliser les citoyens à la pollution lumineuse.

15 - <http://www.darksky.org/idspl>

16 - <https://picdumidi.com/fr/pic-du-midi/rice>

17 - <https://bit.ly/3eanrAL>

Projet Tramenoire : acceptabilité sociale



Porteur de projet

Consortium de recherche pluridisciplinaire : Bureau d'étude Biotope, Université de Lille I, Muséum national d'Histoire naturelle, Centre d'écologie fonctionnelle

Partenaires

Ville de Lille, métropole européenne de Lille, association Coordination mammalogique du Nord de la France, Région

Coût global

150 000 €, dont 50 000 € pour le volet acceptabilité sociale

Contact

Magalie Franchomme - magalie.franchomme@univ-lille.fr

La mise en œuvre opérationnelle d'une Trame noire pose la question de son acceptation par les habitants. L'évolution de l'éclairage public est perçue comme une remise en question des modes de vie et d'un certain niveau de confort entendu de nos jours comme une norme (prolongement des activités, sentiment de sécurité, esthétisme urbain, etc.). Une étude de la perception de la Trame noire a été menée auprès des habitants de la métropole européenne de Lille dans le cadre du projet Tramenoire (Retour d'expérience 4). Les résultats d'enquêtes montrent qu'*a priori*, la Trame noire est socialement acceptable : les citoyens ont des connaissances en matière de faune nocturne et ils ont également conscience de la diversité des espèces avec lesquelles ils cohabitent en zone urbaine et périurbaine. Alors que les espèces nocturnes sont généralement bien appréciées, les chauves-souris suscitent beaucoup d'indifférence et intéressent moins de la moitié des enquêtés. La grande majorité des personnes interrogées s'accordent sur les effets néfastes de l'absence de nuit sur la faune nocturne. D'une manière générale, les citoyens se disent prêts à renoncer au confort que leur octroie l'éclairage public pour protéger ces espèces des impacts de la lumière artificielle. Ceci est donc de nature à rassurer les élus qui pourraient craindre une opposition citoyenne à ce type de projets.

La question de l'acceptabilité sociale a été discutée lors de *focus groups* organisés par la ville de Lille et les universités de Lille et de Toulouse. Leurs contributions ont abouti à la rédaction, avec le service Espaces naturels de la métropole européenne de Lille, d'un argumentaire destiné aux élus, techniciens et habitants du territoire. L'analyse du discours des acteurs permet d'identifier six orientations pour améliorer l'appropriation de la Trame noire par les citoyens :

- 1. mettre en place le plus tôt possible une communication adaptée afin de rendre l'information accessible aux citoyens ;
- 2. mener des actions de sensibilisation, par exemple avec l'organisation d'événements, l'association des comités de quartier, le développement d'itinéraires nocturnes de promenade et le relais d'événements nationaux autour de la nuit ;
- 3. permettre aux citoyens d'expérimenter les mesures proposées pour se faire une opinion, en découvrant par exemple le matériel envisagé comme l'éclairage avec détection de présence ;
- 4. prévoir un espace d'expression ouvert aux citoyens pour faciliter les échanges avec la collectivité. Ceci permettra notamment de discuter des questions de sécurité, puisque ce sont des contre-arguments fréquemment évoqués et de mettre en avant que le lien entre la modification de l'éclairage et la sécurité des biens et des personnes n'est démontré par aucune étude ;
- 5. chercher des compromis entre prise en compte de la faune nocturne et des citoyens, en fonction de la saison, des lieux et donc de la sensibilité de la faune et des usages par les habitants ;
- 6. accompagner spécifiquement les élus pour développer une opinion sur les enjeux de la mise en place d'une Trame noire en s'appuyant sur un argumentaire précis.



6 – Suivre et évaluer ses actions

Comme pour toute action, il est important de disposer d'indicateurs pour suivre et évaluer l'efficacité de la mise en place d'une Trame noire. Un travail a été initié par l'UMS PatriNat en 2018, en collaboration avec un groupe d'experts, pour formuler des pistes d'indicateurs de pollution lumineuse [59]. Cette réflexion vise avant tout des indicateurs nationaux, mais plusieurs pistes peuvent être utiles pour des indicateurs régionaux voire locaux.

Cette réflexion a été menée selon la typologie Pression-État-Réponse (PER) préconisée par l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) qui repose sur trois grands types d'indicateurs :

- **des indicateurs de pression** : il s'agit de mesurer factuellement la pression à laquelle on s'intéresse (ici la lumière artificielle nocturne) et qui pèse sur la biodiversité. Dans son plan biodiversité, le gouvernement français a fixé comme objectif de se doter d'un tel indicateur permettant de suivre et d'évaluer la pollution lumineuse ;
- **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, etc.) mises en œuvre pour réduire la pression et ses effets sur la biodiversité.

Figure 34

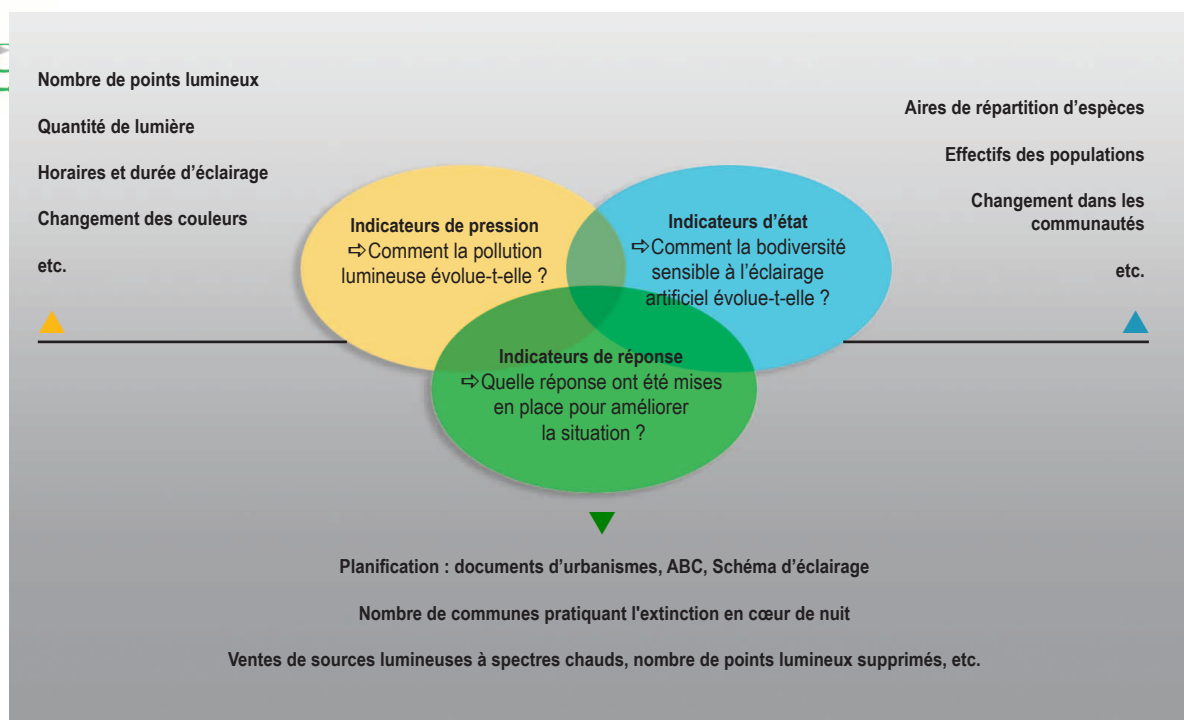


Schéma des indicateurs de suivi et d'évaluation. Source : d'après Sordello et al., 2018 [59].

En termes **d'indicateurs de pression**, il est nécessaire d'envisager la complexité du phénomène de pollution lumineuse qui peut se traduire par différents impacts (éblouissement, perte d'habitat, perte de repère, etc.) et qui peut être lié aussi bien à la quantité de lumière émise qu'à sa composition, sa temporalité ou sa direction (Figure 34).

En termes **d'indicateurs d'état**, il s'agit de suivre l'évolution d'espèces particulièrement sensibles à l'éclairage artificiel (Partie B). Seules les connaissances sur les chauves-souris sont à ce jour suffisamment documentées (hiérarchisation des menaces, données de présence en France, etc.) pour envisager un tel indicateur national. À l'échelle locale en revanche, d'autres groupes peuvent être suffisamment connus en fonction des études menées. Dans ce cas, ils peuvent être pris en compte pour l'élaboration d'indicateurs locaux.

Enfin, en termes **d'indicateurs de réponse**, les possibilités sont nombreuses et peuvent concerner aussi bien l'augmentation des connaissances que la prise en compte de la Trame noire dans les PLU ou encore l'évolution des types de sources lumineuses installées.

Le CGEDD a également publié un rapport fin 2018 [103], faisant un état des lieux des enjeux relatifs à la pollution lumineuse en France. Ce document aborde la question des indicateurs.

Enfin, des indicateurs dans le domaine des sciences sociales devraient aussi être développés. Par exemple, les suivis statistiques des incivilités ou des actes de délinquances nocturnes/diurnes devraient être rendus publics. Cela permettrait d'alimenter objectivement, par des données réelles, le débat sur le rôle de l'éclairage nocturne dans la sécurité des personnes et des biens. Des indicateurs sur l'intérêt et la connaissance du grand public à l'environnement nocturne seraient également intéressants pour mesurer l'évolution de la sensibilisation de la société à cette thématique.

Encore exploratoires, ces aspects de suivi/évaluation de la Trame noire pourront faire l'objet d'une publication technique ultérieure.



Annexes

1 - Cahier des charges « type » pour l'élaboration d'une Trame noire à l'échelle d'une commune ou d'une intercommunalité

Fichier modifiable à télécharger sur : <http://bit.ly/cahierdeschargestype>

PROPOSITION D'UN CAHIER DES CHARGES « TYPE » POUR L'ÉLABORATION D'UNE TRAME NOIRE A L'ÉCHELLE D'UNE COMMUNE OU D'UNE COMMUNAUTÉ DE COMMUNES

Cahier des clauses techniques et particulières (CCTP)

Remarque préalable

Ce cahier des charges est une proposition « type » pour tout maître d'ouvrage - en particulier les communes et intercommunalités - souhaitant lancer un appel d'offre pour l'identification d'une Trame noire.

Il a vocation à être adapté à chaque situation par chaque maître d'ouvrage, ce dernier étant libre d'ajouter, modifier, supprimer telle(s) ou telle(s) partie(s), notamment en fonction des éléments déjà disponibles sur son territoire (données d'éclairage, données de biodiversité...).

Les passages de texte en bleu et en italique en particulier sont à modifier ou à compléter par le maître d'ouvrage.

Ce document a été réalisé dans le cadre du centre de ressources Trame verte et bleue.



2 - Modèle d'arrêté relatif aux horaires d'éclairage public

Fichier modifiable à télécharger sur : <http://bit.ly/arreteextinction>

ARRÊTÉ N°

Le Maire de la commune de

VU l'article L2212-1 du *code général des collectivités territoriales* (CGCT) qui charge le Maire de la police municipale ;

VU l'article L2212-2 du CGCT relatif à la police municipale dont l'objet est « *d'assurer le bon ordre, la sûreté, la sécurité et la salubrité publiques* », et notamment l'alinéa 1° dans sa partie relative à l'éclairage ;

VU la loi n°2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, et notamment son article 41 ;

VU le code de l'environnement, notamment ses articles L.583-1 à L.583-5 ;

VU le décret n°2011-831 du 12 juillet 2011 relatif à la prévention et à la limitation des nuisances lumineuses ;

VU la délibération du conseil municipal du relative à la coupure de l'éclairage public ;

CONSIDÉRANT la nécessité de lutter contre la pollution lumineuse, les émissions de gaz à effet de serre et de réduire la consommation d'énergie ;

CONSIDÉRANT qu'à certaines heures l'éclairage public ne constitue pas une nécessité absolue ;

ARRÊTÉ

■ **Article 1** : Les conditions d'éclairement nocturne sur le périmètre de la commune de ...
..... sont modifiées à compter du, dans les conditions
définies ci-après. Ces modifications sont (permanentes / temporaires / transitoires / expé-
rimentales jusqu'au). (Au terme de cette
expérimentation, elles seront, reconduites par un nouvel arrêté.)

■ **Article 2** : Sur la commune de..... ou dans le(s) zone(s)
définie(s) par la délibération n°.....du pour les voies et
....., répertoriées au cadastre, l'éclairage public sera éteint de
... h... à ...h..., tous les jours / les (jours de la semaine concernés)..... Cette mesure
est permanente / temporaire / expérimentale.

■ **Article 3** : Le présent arrêté, qui sera affiché en mairie, fera l'objet d'un affichage mu-
nicipal, d'une / plusieurs insertion(s) dans le bulletin municipal, d'une publicité par voie de
presse ainsi que d'un avis distribué aux riverains des voies concernées.

■ **Article 4** : Le présent arrêté peut faire l'objet d'un recours pour excès de pouvoir dans
un délai de deux mois à compter de sa publication.

■ **Article 5** : Monsieur / Madame le Maire est chargé(e) de
l'exécution du présent arrêté. Il (elle) prendra ainsi toutes les mesures d'affichage et de
signalisation des zones d'éclairement modifiées sur le territoire de la commune.

■ **Article 6** : Ampliation de cet arrêté sera transmise à : Préfet / Président du Syndicat
d'éclairage / Président du Conseil départemental / Président de l'intercommunalité...

Fait à....., le



Glossaire

Chronotone : moment de jonction entre jour et nuit, à l'instar des « écotones » qui constituent des jonctions entre deux écosystèmes sur le plan spatial. Il est possible que ces moments de transition (crépuscule et aube) concentrent l'activité biologique d'un certain nombre d'espèces nocturnes cherchant à maximiser le compromis « voir sans être vu » (de ses prédateurs notamment).

Composition spectrale de la lumière : proportion des différentes longueurs d'onde dans la lumière émise. Une source lumineuse dont les longueurs d'ondes sont réparties sur l'ensemble du spectre visible pour l'Homme donnera une lumière blanche et *a contrario* colorée si les longueurs d'ondes sont localisées ou si certaines longueurs d'onde sont manquantes. Cette composition spectrale peut se mesurer à l'aide d'un spectromètre.

Continuités écologiques : elles représentent les espaces les plus propices à la biodiversité et à ses déplacements sur un territoire. Elles sont constituées de réservoirs de biodiversité, noyaux les plus riches, et de corridors écologiques qui les relient.

Corridors écologiques : voie de déplacement des espèces entre réservoirs de biodiversité.

Densité surfacique de flux (en lm/m^2) : rapport entre le flux des sources et la surface à éclairer, ce qui correspond à une combinaison entre l'éclairage et la capacité des sources à n'éclairer que la surface utile.

Données proxy : désigne un indicateur indirect d'un phénomène lorsque l'on ne dispose pas de mesures directes et précises. L'urbanisation est par exemple une donnée proxy permettant d'évaluer indirectement la présence d'éclairage public lorsque les données sur ce dernier sont absentes.

Éclairage (en lux) : flux lumineux rapporté à l'aire d'une surface, généralement celle qui reçoit la lumière. L'éclairage est exprimé en lux (équivalent à des lm/m^2) et se mesure à l'aide d'un Luxmètre.

Flux lumineux (en lm) : quantité de lumière émise par une source lumineuse dans toutes les directions en une seconde (c'est donc la somme des intensités lumineuses). Le flux lumineux est exprimé en Lumen (lm). Contrairement à l'intensité lumineuse, le flux lumineux n'est pas perceptible par l'œil. Le flux lumineux total d'un luminaire est une grandeur déclarée par un fabricant de source lumineuse, dans des conditions définies et n'est pas mesurable *in situ*.

Fragmentation : la fragmentation des habitats est le processus par lequel un habitat est converti en plusieurs fragments plus petits, suite à un changement d'usage des terres (urbanisation, conversion en terres agricoles etc.) ou à la création d'infrastructures de transport. Ces îlots d'habitats se trouvent ainsi isolés, séparés, on parle de perte de connectivité.

Horloge astronomique : horloge électronique qui calcule en tout instant la position du soleil et détermine en conséquence l'allumage et l'extinction de l'éclairage public.

Hotspot de biodiversité (ou point chaud de biodiversité) : zone biogéographique, terrestre ou marine, possédant une richesse de biodiversité exceptionnelle à l'échelle de la planète.

Intensité lumineuse (en cd) : concentration de lumière émise dans une direction donnée (« rayon lumineux ») en une seconde. L'intensité lumineuse est exprimée en candela (cd) et se mesure généralement en laboratoire à l'aide d'un goniophotomètre. L'intensité lumineuse est directement liée à la sensibilité spectrale de l'œil associant une quantité de lumière dans un angle solide précis.

Lucifuge : phénomène d'évitement de la lumière par les espèces animales dont le système de vision nocturne n'est pas adapté pour recevoir des quantités importantes de lumière et qui se retrouve donc rapidement saturé en présence d'éclairage artificiel. Certaines espèces peuvent aussi associer la lumière à un risque de prédation accru, ce qui les conduit à l'éviter.

Luminance (en cd/m²) : intensité lumineuse rapportée à une surface apparente qui émet ou réfléchit la lumière. La luminance est exprimée en cd/m² et se mesure à l'aide d'un Luminance-mètre. La luminance caractérise relativement bien la perception de luminosité d'un observateur (ressenti par l'œil) et donc l'éblouissement et le contraste. Plus l'intensité sera forte et la surface de réflexion ou émettrice faible, plus le risque d'éblouissement sera important.

Mélatonine : surtout connue comme étant l'hormone centrale de régulation des rythmes chronobiologiques. La sécrétion de mélatonine augmente peu après la tombée de la nuit. Elle participe au contrôle des rythmes circadiens et à la régulation du rythme jour-nuit.

Noirceur du ciel nocturne : utilisée en particulier dans le domaine de l'astronomie, cette grandeur traduit le niveau de visibilité du ciel étoilé (luminance du ciel nocturne). Elle est exprimée en magnitude par arc seconde au carré (mag/arcsec²) et se mesure à l'aide d'un boîtier dit « SQM » (*Sky Quality Meter*) en se référant à l'Échelle de Bortle.

Phototactisme : phénomène par lequel les animaux et les plantes dirigent leur mouvement (attraction ou répulsion) en fonction de la lumière présente dans leur environnement.

Radiance : sur les images satellites ou les photographies aériennes, on emploie comme grandeur la radiance (luminance énergétique) qui correspond à la quantité de lumière rayonnant d'une surface donnée et perçue par le capteur photographique utilisé dans la prise de vue. Il s'agit donc de la valeur pour chaque pixel de l'image prise. La radiance est exprimée en nanoWatt/cm²/sr.

Réservoir de biodiversité : espace où la biodiversité est la plus riche et la mieux représentée, où les espèces peuvent vivre ou à partir duquel elles se dispersent.

Rythme nycthémeral : rythme fonctionnel suivant la variation de luminosité du jour et de la nuit.

Température de couleur (en K) : traduit la proportion de bleu et de rouge dans le spectre lumineux. Plus la lumière est chaude (forte proportion de rouge) plus la température de couleur est basse et inversement. Elle est exprimée en Kelvin (K).

Trame noire : ensemble connecté de réservoirs de biodiversité et de corridors écologiques pour différents milieux (sous-trames), dont l'identification tient compte d'un niveau d'obscurité suffisant pour la biodiversité nocturne.

Trame verte et bleue : politique publique destinée à lutter contre la fragmentation des habitats naturels. Elle vise à mieux prendre en compte la biodiversité dans l'aménagement du territoire via les continuités écologiques. Ces dernières sont constituées de réservoirs de biodiversité, noyaux les plus riches, et de corridors écologiques qui les relient.



Bibliographie

- 1. Kyba CCM, Kuester T, Sánchez de Miguel A, Baugh K, Jechow A, Hölder F, et al. Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. *Sci Adv*. 2017;3:e1701528. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701528>
- 2. Falchi F, Cinzano P, Duriscoe D, Kyba CCM, Elvidge CD, Baugh K, et al. The new world atlas of artificial night sky brightness. *Sci Adv*. 2016;2:e1600377. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377>
- 3. Guetté A, Godet L, Juigner M, Robin M. Worldwide increase in artificial light at night around protected areas and within biodiversity hotspots. *Biological Conservation*. 2018;223:97–103. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.04.018>
- 4. Hölder F, Moss T, Griefahn B, Kloas W, Voigt CC, Henckel D, et al. The dark side of light: a transdisciplinary research agenda for light pollution policy. *E&S*. 2010;15(4):13 <https://doi.org/10.5751/ES-03685-150413>
- 5. Gaston KJ, Duffy JP, Bennie J. Quantifying the erosion of natural darkness in the global protected area system: Decline of Darkness Within Protected Areas. *Conservation Biology*. 2015;29:1132–41. <https://doi.org/10.1111/cobi.12462>
- 6. Koen EL, Minnaar C, Roever CL, Boyles JG. Emerging threat of the 21st century lightscape to global biodiversity. *Glob Change Biol*. 2018;24:2315–24. <https://doi.org/10.1111/gcb.14146>
- 7. Dananay KL, Benard MF. Artificial light at night decreases metamorphic duration and juvenile growth in a widespread amphibian. *Proc R Soc B*. 2018;285:20180367. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.0367>
- 8. Gao X, Li X, Zhang M, Chi L, Song C, Liu Y. Effects of LED light quality on the growth, survival and metamorphosis of *Haliotis discus hannai* lno larvae. *Aquac Res*. 2016;47:3705–17. <https://doi.org/10.1111/are.12980>
- 9. Foster JJ, Smolka J, Nilsson D-E, Dacke M. How animals follow the stars. *Proc R Soc B*. 2018;285:20172322. <https://doi.org/doi/10.1098/rspb.2017.2322>
- 10. Warrant E. Vision in the dimmest habitats on Earth. *J Comp Physiol A*. 2004;190:765–89. <https://doi.org/10.1007/s00359-004-0546-z>
- 11. Saldaña-Vázquez RA, Munguía-Rosas MA. Lunar phobia in bats and its ecological correlates: A meta-analysis. *Mammalian Biology*. 2013;78:216–9. <https://doi.org/10.1016/j.mambio.2012.08.004>
- 12. Picchi MS, Avolio L, Azzani L, Brombin O, Camerini G. Fireflies and land use in an urban landscape: the case of *Luciola italica* L. (Coleoptera: Lampyridae) in the city of Turin. *J Insect Conserv*. 2013;17:797–805. <https://doi.org/10.1007/s10841-013-9562-z>
- 13. Beier P. Dispersal of juvenile cougars in fragmented habitat. *The Journal of Wildlife Management*. 1995;59:228. <https://doi.org/10.2307/3808935>
- 14. Ciach M, Fröhlich A. Ungulates in the city: light pollution and open habitats predict the probability of roe deer occurring in an urban environment. *Urban Ecosyst*. 2019;22:513–23. <https://doi.org/10.1007/s11252-019-00840-2>

- 15. Sordello R. 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*. 2017;119:16. <https://bit.ly/3d0Whxi>
- 16. Degen T, Mitesser O, Perkin EK, Weiß N-S, Oehlert M, Mattig E, et al. Street lighting: sex-independent impacts on moth movement. Chapman J, éditeur. *J Anim Ecol*. 2016;85:1352–60. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12540>
- 17. Zeale MRK, Stone EL, Zeale E, Browne WJ, Harris S, Jones G. Experimentally manipulating light spectra reveals the importance of dark corridors for commuting bats. *Glob Change Biol*. 2018;24:5909–18. <https://doi.org/10.1111/gcb.14462>
- 18. Bhardwaj M, Soanes K, Lahoz-Monfort JJ, Lumsden LF, van der Ree R. Artificial lighting reduces the effectiveness of wildlife-crossing structures for insectivorous bats. *Journal of Environmental Management*. 2020;262:110313. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110313>
- 19. Bliss-Ketchum LL, de Rivera CE, Turner BC, Weisbaum DM. The effect of artificial light on wildlife use of a passage structure. *Biological Conservation*. 2016;199:25–8. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.04.025>
- 20. van Grunsven RHA, Creemers R, Joosten K, Donners M, Veenendaal EM. Behaviour of migrating toads under artificial lights differs from other phases of their life cycle. *Amphib Reptilia*. 2017;38:49–55. <https://doi.org/10.1163/15685381-00003081>
- 21. Willmott NJ, Henneken J, Elgar MA, Jones TM. Guiding lights: Foraging responses of juvenile nocturnal orb-web spiders to the presence of artificial light at night. *Ethology*. 2019;125:289–97. <https://doi.org/10.1111/eth.12852>
- 22. Stone EL, Harris S, Jones G. Impacts of artificial lighting on bats: a review of challenges and solutions. *Mammalian Biology*. 2015;80:213–9. <https://doi.org/10.1016/j.mambio.2015.02.004>
- 23. Knop E, Zoller L, Ryser R, Gerpe C, Hörler M, Fontaine C. Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature*. 2017;548:206–9. <https://doi.org/10.1038/nature23288>
- 24. Abraham H, Scantlebury DM, Zubidat AE. The loss of ecosystem-services emerging from artificial light at night. *Chronobiology International*. 2019;36:296–8. <https://doi.org/10.1080/07420528.2018.1534122>
- 25. Byrkjedal I, Lislevand T, Vogler S. Do passerine birds utilise artificial light to prolong their diurnal activity during winter at northern latitudes? *Ornis Norv*. 2012;35:37. <https://doi.org/10.15845/on.v35i0.269>
- 26. DeCandido R, Allen D. Nocturnal hunting by peregrine falcons at the Empire State Building, New York City. *The Wilson Journal of Ornithology*. 2006;118:53–8. <https://doi.org/10.1676/1559-4491%282006%29118%5B0053%3ANHBPFA%5D2.0.CO%3B2>
- 27. French-Constant RH, Somers-Yeates R, Bennie J, Economou T, Hodgson D, Spalding A, et al. Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom. *Proc R Soc B*. 2016;283:20160813. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.0813>
- 28. Holveck M-J, Grégoire A, Doutrelant C, Lambrechts MM. Nest height is affected by lamppost lighting proximity in addition to nestbox size in urban great tits. *J Avian Biol*. 2019;50. <https://doi.org/10.1111/jav.01798>
- 29. Riley WD, Davison PI, Maxwell DL, Newman RC, Ives MJ. A laboratory experiment to determine the dispersal response of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fry to street light intensity. *Freshw Biol*. 2015;60:1016–28. <https://doi.org/10.1111/fwb.12568>
- 30. Voigt CC, Rehnig K, Lindecke O, Petersons G. Migratory bats are attracted by red light but not by warm-white light: Implications for the protection of nocturnal migrants. *Ecol Evol*. 2018;8:9353–61. <https://doi.org/10.1002/ece3.4400>

- 31. Fukuda N, Kobayashi M, Ubukawa M, Takayanagi, K, Sase S. Effects of light quality, intensity and duration from different artificial light sources on the growth of petunia (*Petunia×hybrida* Vilm.). *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*. 2002;71:509–16. <https://doi.org/10.2503/jjshs.71.509>
- 32. Sordello R. Pistes méthodologiques pour prendre en compte la pollution lumineuse dans les réseaux écologiques. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*. 2017. <https://doi.org/10.4000/vertigo.18730>
- 33. Azam C, Le Viol I, Julien J-F, Bas Y, Kerbirou C. Disentangling the relative effect of light pollution, impervious surfaces and intensive agriculture on bat activity with a national-scale monitoring program. *Landscape Ecol*. 2016;31:2471–83. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0417-3>
- 34. Pauwels J, Le Viol I, Azam C, Valet N, Julien J-F, Bas Y, et al. Accounting for artificial light impact on bat activity for a biodiversity-friendly urban planning. *Landscape and Urban Planning*. 2019;183:12–25. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.08.030>
- 35. Eccard JA, Scheffler I, Franke S, Hoffmann J. Off-grid: solar powered LED illumination impacts epigeal arthropods. Leather S, Stewart A, éditeurs. *Insect Conserv Divers*. 2018;11:600–7. <https://doi.org/10.1111/icad.12303>
- 36. Dixon DR, Dixon LRJ, Bishop JD, Pettifor RA. Lunar-related reproductive behaviour in the badger (*Meles meles*). *Acta Ethol*. 2006;9:59–63. <https://doi.org/10.1007/s10211-006-0016-4>
- 37. Sordello R. *Première capitalisation méthodologique sur les Schémas régionaux de cohérence écologique adoptés ou en projet - Pollution lumineuse*. MNHN-SPN - CDR TVB; 2015 p. 15. <https://bit.ly/3jBqRjv>
- 38. Sordello R. Pollution lumineuse et trame verte et bleue : vers une trame noire en France ? *Territory in movement Journal of geography and planning*. Université Lille 1 Sciences et Technologies; 2017. <https://doi.org/10.4000/tem.4381>
- 39. Gaynor KM, Hojnowski CE, Carter NH, Brashares JS. The influence of human disturbance on wildlife nocturnality. *Science. American Association for the Advancement of Science*; 2018;360:1232–5. <https://doi.org/10.1126/science.aar7121>
- 40. Hölker F, Wolter C, Perkin EK, Tockner K. Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in Ecology & Evolution*. 2010;25:681–2. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.09.007>
- 41. Perkin EK, Hölker F, Richardson JS, Sadler JP, Wolter C, Tockner K. The influence of artificial light on stream and riparian ecosystems: questions, challenges, and perspectives. *Ecosphere*. 2011;2:art122. <https://doi.org/10.1890/ES11-00241.1>
- 42. Hall AS. Acute artificial light diminishes central texas anuran calling behavior. *The American Midland Naturalist*. 2016;175:183–93. <https://doi.org/10.1674/0003-0031-175.2.183>
- 43. Spoelstra K, van Grunsven RHA, Donners M, Gienapp P, Huigens ME, Slaterus R, et al. Experimental illumination of natural habitat—an experimental set-up to assess the direct and indirect ecological consequences of artificial light of different spectral composition. *Phil Trans R Soc B*. 2015;370:20140129. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0129>
- 44. Davies TW, Bennie J, Cruse D, Blumgart D, Inger R, Gaston KJ. Multiple night-time light-emitting diode lighting strategies impact grassland invertebrate assemblages. *Glob Change Biol*. 2017;23:2641–8. <https://doi.org/10.1111/gcb.13615>
- 45. Davies TW, Duffy JP, Bennie J, Gaston KJ. The nature, extent, and ecological implications of marine light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2014;12:347–55. <https://doi.org/10.1890/130281>
- 46. Sordello R. Comment gérer la lumière artificielle dans les continuités écologiques ? *Sciences Eaux & Territoires*. 2018;25:86-89 <https://doi.org/10.3917/set.025.0086>

- 47. Sordello R, Jupille O, Deutsch É, Vauclair S, Salmon-Legagneur L, Faure J-B. Trame noire : un sujet qui « monte » dans les territoires. *Sciences Eaux & Territoires*. 2018;25:78-85 <https://doi.org/10.3917/set.025.0078>
- 48. TERROIKO. *Étude pour la définition et le diagnostic de la Trame Noire*. 2018 p. 2.
- 49. Laforge A, Pauwels J, Faure B, Bas Y, Kerbiriou C, Fonderflick J, et al. Reducing light pollution improves connectivity for bats in urban landscapes. *Landscape Ecol*. 2019;34:793–809. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00803-0>
- 50. Heinrich M. *Mettre en Lumière l'Univers de la Nuit - Guide pour une sobriété de l'éclairage public dans les Vosges Centrales. Volume I : Une Trame Noire pour le SCoT*. 2018 p. 60. http://www.scot-vosges-centrales.fr/fichiers/page/Volume_1.pdf
- 51. Heinrich M. *Mettre en Lumière l'Univers de la Nuit - Guide pour une sobriété de l'éclairage public dans les Vosges Centrales. Volume II : Concevoir un projet d'éclairage compatible avec la Trame Noire du SCoT*. 2018 p. 56. http://www.scot-vosges-centrales.fr/fichiers/page/Mettre_en_Lumiere_I_Univers_de_la_Nuit_Vol_II.pdf
- 52. Ranzoni J, Giuliani G, Huber L, Ray N. Modelling the nocturnal ecological continuum of the State of Geneva, Switzerland, based on high-resolution nighttime imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2019;16:100268. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100268>
- 53. Granier H. *Comment prendre en compte la pollution lumineuse dans les continuités écologiques - Application au territoire du Parc naturel régional des Causses du Quercy*. Parc naturel régional des Causses du Quercy; 2012 p. 102.
- 54. Sordello R, Vanpeene S, Azam C, Kerbiriou C, Le Viol I, Le Tallec T. *Effet fragmentant de la lumière artificielle - Quels impacts sur la mobilité des espèces et comment peuvent-ils être pris en compte dans les réseaux écologiques ?* MNHN-SPN. 2014 p. 32. <https://bit.ly/3iDicM1>
- 55. Poncet E. *Étude de la tolérance de deux espèces (Petit Rhinolophe et Grand Rhinolophe) et d'un groupe d'espèces (genre Myotis) à la pollution lumineuse*. Conservatoire d'espaces naturels de Midi-Pyrénées; 2020 p. 37.
- 56. Katz Y, Levin N. Quantifying urban light pollution — A comparison between field measurements and EROS-B imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2016;177:65–77. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.017>
- 57. Jiang W, He G, Long T, Guo H, Yin R, Leng W, et al. Potentiality of Using Luojia 1-01 Nighttime light imagery to investigate artificial light pollution. *Sensors*. 2018;18:2900. <https://doi.org/10.3390/s18092900>
- 58. Li X, Zhao L, Li D, Xu H. Mapping Urban Extent Using Luojia 1-01 Nighttime light imagery. *Sensors*. 2018;18:3665. <https://doi.org/10.3390/s18113665>
- 59. Sordello R, Azam C, Amsallem J, Bas Y, Billon L, Busson S, et al. *Construire des indicateurs nationaux sur la pollution lumineuse*. UMS PatritiNat, Cerema, CESCO, DarkSkyLab, IRD, Irstea; 2018 p. 48. <https://bit.ly/3iAa8vN>
- 60. Altermatt F, Ebert D. Reduced flight-to-light behaviour of moth populations exposed to long-term urban light pollution. *Biol Lett*. 2016;12:20160111. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0111>
- 61. Bolton D, Mayer-Pinto M, Clark GF, Dafforn KA, Brassil WA, Becker A, et al. Coastal urban lighting has ecological consequences for multiple trophic levels under the sea. *Science of The Total Environment*. 2017;576:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.037>
- 62. Elgert C, Hopkins J, Kaitala A, Candolin U. Reproduction under light pollution: maladaptive response to spatial variation in artificial light in a glow-worm. *Proc R Soc B*. 2020;287:20200806. <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.0806>

- 63. Rivas ML, Santidrián Tomillo P, Diéguez Uribeondo J, Marco A. Leatherback hatchling sea-finding in response to artificial lighting: Interaction between wavelength and moonlight. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 2015;463:143–9. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2014.12.001>
- 64. Baker BJ, Richardson JML. The effect of artificial light on male breeding-season behaviour in green frogs, *Rana clamitans melanota*. *Can J Zool*. 2006;84:1528–32. <https://doi.org/10.1139/z06-142>
- 65. Xue X, Lin Y, Zheng Q, Wang K, Zhang J, Deng J, et al. Mapping the fine-scale spatial pattern of artificial light pollution at night in urban environments from the perspective of bird habitats. *Science of The Total Environment*. 2020;702:134725. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134725>
- 66. Haddock JK, Threlfall CG, Law B, Hochuli DF. Light pollution at the urban forest edge negatively impacts insectivorous bats. *Biological Conservation*. 2019;236:17–28. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.05.016>
- 67. Hoffmann J, Schirmer A, Eccard JA. Light pollution affects space use and interaction of two small mammal species irrespective of personality. *BMC Ecol*. 2019;19:26. <https://doi.org/10.1186/s12898-019-0241-0>
- 68. Berge J, Geoffroy M, Daase M, Cottier F, Priou P, Cohen JH, et al. Artificial light during the polar night disrupts Arctic fish and zooplankton behaviour down to 200 m depth. *Commun Biol*. 2020;3:102. <https://doi.org/10.1038/s42003-020-0807-6>
- 69. Škvareninová J, Tuhárska M, Škvarenina J, Babálová D, Slobodníková L, Slobodník B, et al. Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment. *Moravian Geographical Reports*. 2017;25:282–90. <https://doi.org/10.1515/mgr-2017-0024>
- 70. Davies TW, Smyth T. Why artificial light at night should be a focus for global change research in the 21st century. *Glob Change Biol*. 2018;24:872–82. <https://doi.org/10.1111/gcb.13927>
- 71. Gaston KJ, Bennie J, Davies TW, Hopkins J. The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal: Nighttime light pollution. *Biol Rev*. 2013;88:912–27. <https://doi.org/10.1111/brv.12036>
- 72. Azam C, Le Viol I, Bas Y, Zissis G, Vernet A, Julien J-F, et al. Evidence for distance and illuminance thresholds in the effects of artificial lighting on bat activity. *Landscape and Urban Planning*. 2018;175:123–35. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.02.011>
- 73. Mello MAR, Kalko EKV, Silva WR. Effects of moonlight on the capturability of frugivorous phyllostomid bats (*Chiroptera: Phyllostomidae*) at different time scales. *Zoologia (Curitiba)*. 2013;30:397–402. <https://doi.org/10.1590/S1984-46702013000400005>
- 74. Upham NS, Hafner JC. Do nocturnal rodents in the great basin desert avoid moonlight? *Journal of Mammalogy*. 2013;94:59–72. <https://doi.org/10.1644/12-MAMM-A-076.1>
- 75. Clarke JA. Moonlight's influence on predator/prey interactions between short-eared owls (*Asio flammeus*) and deermice (*Peromyscus maniculatus*). *Behavioral Ecology and Sociobiology*. 1983 ;13(3):205-209. <https://doi.org/10.1007/BF00299924>
- 76. Yamamoto T, Takahashi A, Yoda K, Katsumata N, Watanabe S, Sato K, et al. The lunar cycle affects at-sea behaviour in a pelagic seabird, the streaked shearwater, *Calonectris leucomelas*. *Animal Behaviour*. 2008;76:1647–52. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2008.07.019>
- 77. Seligmann H, Anderson SC, Autumn K, Bouskila A, Saf R, Tuniyev BS, et al. Analysis of the locomotor activity of a nocturnal desert lizard (*Reptilia: Gekkonidae: Teratoscincus scincus*) under varying moonlight. *Zoology*. 2007;110:104–17. <https://doi.org/10.1016/j.zool.2006.11.005>
- 78. Pauwels J. *Light pollution & biodiversity: What are the levers of action to limit the impact of artificial lighting on nocturnal fauna?* Museum national d'histoire naturelle - MNHN PARIS. 2018 p. 350. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02314264/document>

- 79. Matzke EB. The effect of street lights in delaying leaf-fall in certain trees. *American Journal of Botany*. 1936;23:446–52. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1936.tb09009.x>
- 80. Bennett ATD, Cuthills IC. Ultraviolet vision in birds: what function? *Vision Res*. 1994;34(11):1471–8. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/004269899490149X?via%3Dihub>
- 81. Cowan T, Gries G. Ultraviolet and violet light: attractive orientation cues for the Indian meal moth, *Plodia interpunctella*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. 2009;131:148–58. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(94\)90149-X](https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)90149-X)
- 82. Grace MS, Woodward OM, Church DR, Calisch G. Prey targeting by the infrared-imaging snake Python: effects of experimental and congenital visual deprivation. 2001; *Behavioural Brain Research*. 119(1):23–31. [https://doi.org/10.1016/S0166-4328\(00\)00336-3](https://doi.org/10.1016/S0166-4328(00)00336-3)
- 83. Shcherbakov D, Knörzer A, Espenhahn S, Hilbig R, Haas U, Blum M. Sensitivity differences in fish offer near-infrared vision as an adaptable evolutionary trait. Dyer AG, éditeur. *PLoS ONE*. 2013;8:e64429. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064429>
- 84. Sordello R. *Pollution lumineuse : longueurs d'ondes impactantes pour la biodiversité - Exploitation de la synthèse bibliographique de Musters et al.* (2009). UMS Patrinat OFB-CNRS-MNHN; 2017 p. 18. <https://bit.ly/2PEbbSz>
- 85. Musters CJM, Snelder DJ, Vos P. *The effects of coloured light on nature*. 2009 p. 43. <https://bit.ly/3iAKQ0t>
- 86. Tosini G, Ferguson I, Tsubota K. Effects of blue light on the circadian system and eye physiology. *Molecular Vision*. 2016; 22:61–72. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4734149/>
- 87. Apostol KG, Dumroese RK, Pinto JR, Davis AS. Response of conifer species from three latitudinal populations to light spectra generated by light-emitting diodes and high-pressure sodium lamps. *Can J For Res*. 2015;45:1711–9. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0106>
- 88. Grubisic M, van Grunsven RHA, Manfrin A, Monaghan MT, Hölker F. A transition to white LED increases ecological impacts of nocturnal illumination on aquatic primary producers in a lowland agricultural drainage ditch. *Environmental Pollution*. 2018;240:630–8. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.146>
- 89. Stone EL, Wakefield A, Harris S, Jones G. The impacts of new street light technologies: experimentally testing the effects on bats of changing from low-pressure sodium to white metal halide. *Phil Trans R Soc B*. 2015;370:20140127. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0127>
- 90. Longcore T, Aldern HL, Eggers JF, Flores S, Franco L, Hirshfield-Yamanishi E, et al. Tuning the white light spectrum of light emitting diode lamps to reduce attraction of nocturnal arthropods. *Phil Trans R Soc B*. 2015;370:20140125. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0125>
- 91. Bolliger J, Hennet T, Wermelinger B, Blum S, Haller J, Obrist MK. Low impact of two LED colors on nocturnal insect abundance and bat activity in a peri-urban environment. *J Insect Conserv*. 2020;24:625–35. <https://doi.org/10.1007/s10841-020-00235-1>
- 92. Lusti C, Ineichen S. *Impact of LED floodlight on the activity range of the common European glow-worm, Lampyrus noctiluca*. 2016 p. 2. <https://bit.ly/3bqs6z2>
- 93. Rydell J, Eklöf J, Sánchez-Navarro S. Age of enlightenment: long-term effects of outdoor aesthetic lights on bats in churches. *R Soc Open Sci*. 2017;4:161077. <https://doi.org/10.1098/rsos.161077>
- 94. Bennie J, Davies TW, Cruse D, Gaston KJ. Ecological effects of artificial light at night on wild plants. Swenson N, éditeur. *J Ecol*. 2016;104:611–20. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12551>

- 95. Bennie J, Davies TW, Cruse D, Inger R, Gaston KJ. Cascading effects of artificial light at night: resource-mediated control of herbivores in a grassland ecosystem. *Phil Trans R Soc B*. 2015;370:20140131. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0131>
- 96. Azam C, Kerbiriou C, Vernet A, Julien J-F, Bas Y, Plichard L, et al. Is part-night lighting an effective measure to limit the impacts of artificial lighting on bats? *Glob Change Biol*. 2015;21:4333-41. <https://doi.org/10.1111/gcb.13036>
- 97. Day J, Baker J, Schofield H, Mathews F, Gaston KJ. Part-night lighting: implications for bat conservation: Part-night lighting and bats. *Anim Conserv*. 2015;18:512-6. <https://doi.org/10.1111/acv.12200>
- 98. Li Y, Ma W, Kang Q, Qiao L, Tang D, Qiu J, et al. Night or darkness, which intensifies the feeling of fear? *International Journal of Psychophysiology*. 2015;97:46-57. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2015.04.021>
- 99. Peña-García A, Hurtado A, Aguilar-Luzón MC. Impact of public lighting on pedestrians' perception of safety and well-being. *Safety Science*. 2015;78:142-8. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.04.009>
- 100. Lorenc T, Petticrew M, Whitehead M, Neary D, Clayton S, Wright K, et al. Environmental interventions to reduce fear of crime: systematic review of effectiveness. *Syst Rev*. 2013;2:30. <https://doi.org/10.1186/2046-4053-2-30>
- 101. Steinbach R, Perkins C, Tompson L, Johnson S, Armstrong B, Green J, et al. The effect of reduced street lighting on road casualties and crime in England and Wales: controlled interrupted time series analysis. *J Epidemiol Community Health*. 2015;69:1118-24. <https://doi.org/10.1136/jech-2015-206012>
- 102. Salmon-Legagneur L. Règlements - Panneau de signalisation « Extinction de l'éclairage public ». 2017 p. 2.
- 103. Auricoste I, Landel J-F, Simoné M. *la reconquête de la nuit. La pollution lumineuse : état des lieux et propositions*. 2018 p. 110. <https://bit.ly/3korAWE>

Webographie

- Site du centre de ressources Trame verte et bleue : <http://www.trameverteetbleue.fr/>
- Nuit France : www.nuitfrance.fr

Auteurs, contributeurs et relecteurs

■ Auteurs

- Romain Sordello, Unité mixte de service Patrimoine naturel (OFB-CNRS-MNHN)
- Fabien Paquier, Office français de la biodiversité
- Aurélien Daloz, Office français de la biodiversité

■ Contacts

- Romain Sordello : romain.sordello@mnhn.fr
- Fabien Paquier : fabien.paquier@ofb.gouv.fr

■ Contributeurs

Pour la Partie B :

- Jennifer Amsellem (INRAE)
- Mathieu Chailloux (INRAE)
- Bastien Nguyen Duy (La TeleScop)
- Sébastien Vaclair (Darksylab)

Pour la Partie C sur les outils :

- Samuel Busson (Cerema)
- Paul Verny (Cerema)

Pour les retours d'expérience :

- Roger Couillet (Ville de Douai)
- Eloïse Deutsch (Parc national des Pyrénées)
- Baptiste Faure (Biotope)
- Magalie Franchomme (Université de Lille)
- Lucie Gandon (PNR du Gâtinais français)
- Christelle Hinnewinkel (Université de Lille)
- Betty Houguet (PNR de la Haute Vallée de Chevreuse)
- Jacques Grondhal (Syndicat mixte du Scot des Vosges centrales)
- Agathe Kühnel (PNR des Causses du Quercy)
- Marie-Clélia Lankester (PNR des Causses du Quercy)
- Julie Pauwels (Auddicé biodiversité - MNHN)
- Nicolas Ray (Université de Genève)
- Yoan Roulet (Auddicé biodiversité)
- Morgane Thieux-Lavaur (OFB)
- Yohann Tison (Ville de Lille)
- Nicolas Valet (Auddicé biodiversité)

■ Relecteurs

- Véronique Barre (OFB)
- Lydia Beuneiche (OFB)
- Romain Borrod (Cerema)
- Julie Chaurand (La TeleScop)
- Sébastien Flores (OFB)
- Béatrice Gentil-Salasc (OFB)
- Eric Guinard (Cerema)
- Matthieu Iodice (Cerema)
- Lucile Jacquot (ACERE)
- Antoine Lombard (ministère de la Transition écologique et solidaire)
- Xavier Loubert-Davaine (Société Eliomys)
- Thierry Mougey (Fédération des Parcs naturels régionaux de France)
- Philippe Moutet (Fédération des Parcs naturels régionaux de France)
- Yorick Reyjol (UMS Patrinat)
- Mara Rihouet (OFB)
- Sylvie Vanpeene (INRAE)

■ Citation

- Sordello R., Paquier F. et Daloz A. 2021. Trame noire, méthodologie d'élaboration et outils pour sa mise en œuvre. Office français de la biodiversité. *Collection Comprendre pour agir*. 112 pages

■ Édition

- Béatrice Gentil-Salasc

■ Création et mise en page

- Béatrice Saurel (saurelb@free.fr)

■ Crédits photos

- Couverture : J.P. Borda, A. Daloz, J. De Vos, S. Di Mauro, A. Jailloux, Ph. Massit, L. Roubaudi, R. Sordello, L. Viatour
- Page 7 : Grand murin (*Myotis myotis*) en vol - Philippe Massit / OFB
- Page 25 : Photo satellite de Montpellier - Image de JILIN-1 CGSatellite, distribuée par La TeleScop
- Page 61 : Paysage nocturne des Cévennes - Guillaume Canat

Cet ouvrage fait partie de la **collection Comprendre pour agir** consultable sur le portail technique de l'Office français de la biodiversité (<https://professionnels.ofb.fr/fr/comprendre-pour-agir>).

Ci-dessous, les derniers numéros parus

- 24 - Combien coûte la dégradation des milieux aquatiques pour les usagers de l'eau ? L'évaluation des dépenses compensatoires (janvier 2017)
- 25 - Les zones de rejet végétalisées : repères scientifiques et recommandations pour la mise en oeuvre (février 2017)
- 26 - Du dommage écologique au préjudice écologique. Comment la société prend-elle en compte et répare-t-elle les atteintes causées à l'eau et aux milieux aquatiques ? (avril 2017)
- 27 - Restauration de cours d'eau en France : comment les définitions et les pratiques ont-elles évolué dans le temps et dans l'espace, quelles pistes d'action pour le futur (juillet 2017)
- 28 - Impact cumulé des retenues d'eau sur le milieu aquatique. Expertise scientifique collective (novembre 2017)
- 29 - Les espèces exotiques envahissantes dans les milieux aquatiques : connaissances pratiques et expériences de gestion - Vol. 3 Expériences de gestion (bis) (mai 2018)
- 30 - La prévision à moyen et long terme de la demande en eau potable : bilan des méthodes et pratiques actuelles (janvier 2019)
- 31 - Les bénéfices liés à la préservation des eaux souterraines : pourquoi et comment leur donner une valeur monétaire ? (novembre 2018)
- 32 - Lutter contre les micropolluants dans les milieux aquatiques : quels enseignements des études en sciences humaines et sociales ? (septembre 2018)
- 33 - Agro-écologie et Trame verte et bleue : des synergies à valoriser (avril 2019)
- 34 - Évaluer le franchissement des obstacles par les poissons et macrocrustacés dans les départements insulaires ultramarins - Principes et méthode (décembre 2019)
- 35 - Bresle - Oir - Scorff - Nivelle. Trois décennies d'observations et de recherche sur les poissons migrateurs (mai 2020)
- 36 - Dimensionnement de la compensation *ex ante* des atteintes à la biodiversité
- État de l'art des approches, méthodes disponibles et pratiques en vigueur (mai 2020)
- 37 - Histoire et impacts environnementaux de l'orpaillage en Guyane - Clefs de compréhension des tensions actuelles (juin 2020)
- 38 - Bilan pour l'action de la stratégie nationale pour la biodiversité 2011-2020 : synthèse de l'évaluation (juillet 2020)
- 39 - Trame noire, méthodes d'élaboration et outils pour sa mise en oeuvre (mars 2021)



Dépôt légal à parution

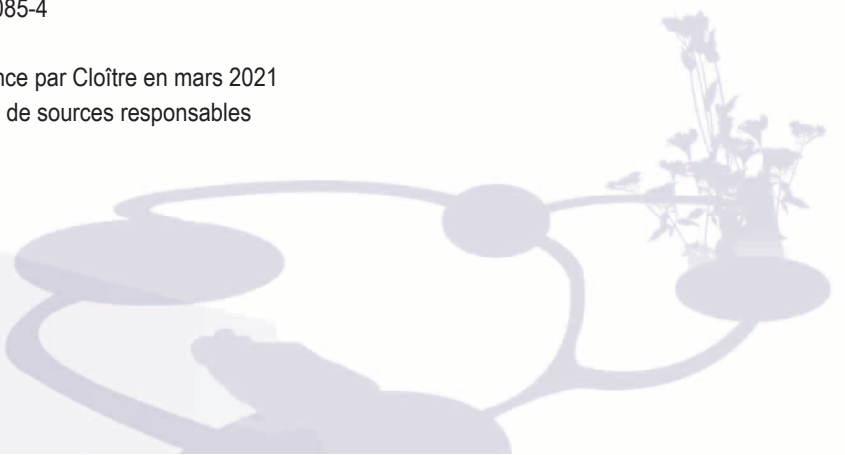
ISBN web : 978-2-38170-084-7

ISBN print : 978-2-38170-085-4

Gratuit

Achevé d'imprimer en France par Cloître en mars 2021

Imprimé sur du papier issu de sources responsables



Conséquence de l'artificialisation croissante de nos territoires, l'éclairage nocturne, public ou privé, engendre une perte d'habitats naturels, une fragmentation accrue et une mortalité directe pour les espèces vivant la nuit. À l'instar de la Trame verte et bleue qui a été envisagée essentiellement du point de vue des espèces diurnes, il est désormais nécessaire de préserver et de remettre en bon état les continuités écologiques nocturnes, dans un contexte de pollution lumineuse en constante progression.

Ce nouveau numéro de la collection *Comprendre pour agir* de l'Office français de la biodiversité vise à proposer des éléments de méthodes pour l'identification de la Trame noire sur un territoire, et des outils réglementaires et techniques pour gérer l'éclairage artificiel au sein des continuités écologiques.

Il s'adresse à la fois aux élus et techniciens des collectivités territoriales, des syndicats d'énergie, des Parcs naturels régionaux et nationaux, ainsi qu'aux associations et à toute personne s'intéressant à la Trame verte et bleue et à l'impact de la pollution lumineuse sur le vivant.

Ce guide propose en complément un cahier des charges « type » pour la mise en œuvre d'une Trame noire à l'échelle d'une commune ou d'une intercommunalité, ainsi qu'un modèle d'arrêté relatif aux horaires d'éclairage public. Il se veut ainsi opérationnel pour susciter la mobilisation et donner des clés pour agir en faveur de la biodiversité nocturne, dans une vision intégrée et transversale des enjeux environnementaux à l'échelle d'un territoire.



Romain Sordello, ingénieur écologue, spécialisé sur les réseaux écologiques et sur la pollution lumineuse à l'UMS PatriNat. Depuis 10 ans il fournit un appui à la mise en œuvre de la Trame verte et bleue au sein du Centre de ressources. À travers une veille bibliographique, il assure un transfert des connaissances scientifiques sur les effets de la lumière artificielle nocturne sur la biodiversité vers le ministère en charge de l'écologie, les services de l'État et les acteurs opérationnels (métropoles, espaces naturels, éclairagistes, grand public, etc.). Il a contribué à l'émergence de la Trame noire en France et a suivi les premiers projets exploratoires.

Fabien Paquier, écologue de formation (Université de Montpellier) et ingénieur territorial, est chargé de mission Trame verte et bleue au sein de l'Office français de la biodiversité. Il pilote l'animation du centre de ressources Trame verte et bleue (TVB) en appui au ministère de la Transition écologique. Le centre de ressources a vocation à accompagner et à former les acteurs de la TVB, à favoriser les échanges dans le cadre de journées techniques, à produire et à mettre à disposition des ressources techniques et scientifiques.

Aurélien Daloz, ingénieur écologue pluridisciplinaire, est chef adjoint du service Usages et gestion de la biodiversité de l'Office français de la biodiversité. Il a contribué au lancement et au déploiement du centre de ressources Trame verte et bleue, mais aussi d'autres dispositifs de développement des compétences et d'animation de réseaux à destination des gestionnaires de la biodiversité. Son parcours l'a mené de la médiation scientifique au management d'équipes, en passant par l'ingénierie et le conseil. Ses activités se portent aujourd'hui sur l'accompagnement technique des acteurs dont l'activité est étroitement liée à la préservation de la biodiversité.