



HAL
open science

Couplage de données et méthodes, une approche méthodologique originale de modélisation de la trame noire

Edouard Pinçon, Jérôme Sawtschuk, Edna Hernández González

► To cite this version:

Edouard Pinçon, Jérôme Sawtschuk, Edna Hernández González. Couplage de données et méthodes, une approche méthodologique originale de modélisation de la trame noire. *Cybergeog: Revue européenne de géographie / European journal of geography*, 2024, 10.4000/12mla . hal-04775877

HAL Id: hal-04775877

<https://hal.science/hal-04775877v1>

Submitted on 22 Nov 2024

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

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



Cybergeo : revue européenne de géographie / European journal of geography

Revue fondée en 1996 / Journal founded in 1996
Systèmes, Modélisation, Géostatistiques | 2024

Couplage de données et méthodes, une approche méthodologique originale de modélisation de la trame noire

*Coupling data and methods, an original methodological approach to modeling
the black frame*

*Combinación de datos y métodos, una original aproximación metodológica para
modelar la trama negra/oscura en el contexto de contaminación lumínica*

Edouard Pinçon, Jérôme Sawtschuk et Edna Hernández González



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/cybergeo/41375>

DOI : 10.4000/12mla

ISSN : 1278-3366

Éditeur

UMR 8504 Géographie-cités

Ce document vous est fourni par Université de Bretagne Occidentale



Référence électronique

Edouard Pinçon, Jérôme Sawtschuk et Edna Hernández González, « Couplage de données et méthodes, une approche méthodologique originale de modélisation de la trame noire », *Cybergeo: European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 1077, mis en ligne le 06 novembre 2024, consulté le 22 novembre 2024. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/41375> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/12mla>

Ce document a été généré automatiquement le 6 novembre 2024.



Le texte seul est utilisable sous licence CC BY 4.0. Les autres éléments (illustrations, fichiers annexes importés) sont « Tous droits réservés », sauf mention contraire.

Couplage de données et méthodes, une approche méthodologique originale de modélisation de la trame noire

*Coupling data and methods, an original methodological approach to modeling
the black frame*

*Combinación de datos y métodos, una original aproximación metodológica para
modelar la trama negra/oscura en el contexto de contaminación lumínica*

Edouard Pinçon, Jérôme Sawtschuk et Edna Hernández González

Introduction

- 1 Les constantes avancées technologiques depuis la révolution industrielle ont entraîné une explosion démographique et une consommation de ressources (et leurs pollutions associées) toujours croissantes aboutissant à une pression sur l'environnement désormais critique (Dansereau, 1957). Sur le plan de la biodiversité, l'éclairage artificiel constitue une menace de modifications importantes des écosystèmes et de dégradation (Hölker *et al.*, 2010 ; Longcore, Rich, 2016 ; Lao *et al.*, 2020 ; Mena *et al.*, 2021) : au-delà des espèces nocturnes, celui-ci bouleverse également les rythmes circadiens des espèces diurnes et jusqu'au règne végétal (Dunlap, 1999 ; Dominoni, Nelson, 2018 ; Segrestin *et al.*, 2021). La prise en compte de la protection de la biodiversité dans les politiques de gestion du territoire s'en trouve donc élargie et devient prépondérante (Orientations nationales de la trame verte et bleue, 2019 ; Stratégie nationale biodiversité 2030, 2024 ; Ome, 2023). La prise de décision pour des réponses efficaces nécessite une connaissance plus fine du fonctionnement des écosystèmes et donc des modèles plus performants. Enfin, la prise en compte de l'éclairage artificiel et de la pollution lumineuse dans la révision des SCoT (Schéma de Cohérence Territoriale) et

PLU (Plan Local d'Urbanisme) requiert des outils d'aide à la décision territorialisés. C'est à cet enjeu que nous nous proposons de répondre en explorant des méthodes innovantes pour tirer le meilleur parti des jeux de données existants et ainsi contribuer à une meilleure lecture des enjeux locaux en termes de biodiversité et d'aménagement du territoire.

Émergence de la trame noire

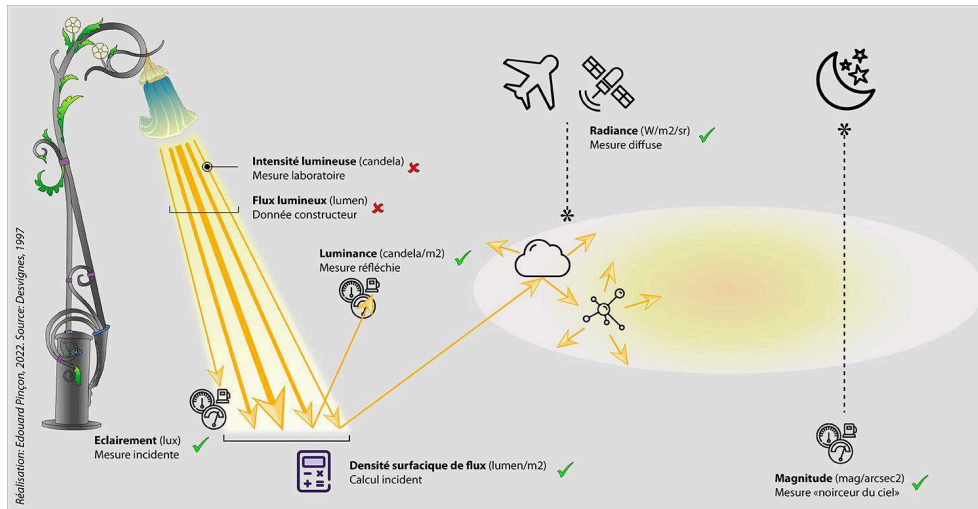
- 2 L'intervention humaine sur son environnement entraîne des impacts sur celui-ci, principalement négatifs et résumés sous le terme de "pollutions". Ces dernières sont définies comme *"toutes modification anthropogénique d'un écosystème se traduisant par un changement de concentration des constituants chimiques naturels, ou résultant de l'introduction dans la biosphère de substances chimiques artificielles, d'une perturbation du flux de l'énergie, de l'intensité des rayonnements, de la circulation de la matière ou encore de l'introduction d'espèces exotiques dans une biocénose naturelle"* (Ramade, 2012, p.55).
- 3 Au-delà du strict champ scientifique, les considérations contemporaines sur le changement climatique nécessitent des actions gouvernementales. En France, le Grenelle de l'environnement (2007) aboutit à la création de la Trame Verte et Bleue en tant qu'outil de gouvernance (Cormier *et al.*, 2010). De plus, la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages du 8 août 2016 a fait compléter la notion de trame verte et bleue avec la mise en place d'une trame noire.
- 4 Parallèlement, l'éclairage artificiel augmente régulièrement, impactant 99 % de la population européenne en 2010 (Falchi *et al.*, 2016 ; Davies, Smyth, 2018), et aboutit à une nouvelle forme de pollution, la pollution lumineuse. En 2010, la thèse de doctorat de Samuel Challéat intitulée "Sauver la nuit : empreinte lumineuse, urbanisme et gouvernance des territoires" attire l'attention sur cette problématique contemporaine (Challéat, 2010).
- 5 En 2016, l'article L371-1 du code de l'environnement inclut la gestion de l'éclairage artificiel la nuit dans la Trame Verte et Bleue. L'arrêté du 27/12/2018 relatif à la prévention, à la réduction et à la limitation des nuisances lumineuses amène à traiter cette question de façon spécifique avec l'apparition de la Trame Noire. Les premières méthodes sont publiées en France en 2018 par l'Office Français de la Biodiversité (Sordello *et al.*, 2018). Ces méthodes restent peu nombreuses et dérivées de celles utilisées dans le cadre de la Trame Verte. Il paraît donc pertinent d'explorer de nouvelles méthodes de modélisation pour répondre aux objectifs réglementaires d'une part, mais aussi et surtout d'approfondir la compréhension des effets de la lumière artificielle sur la biodiversité nocturne.

Mesurer l'éclairage

- 6 Afin de pouvoir caractériser la pollution lumineuse, il faut d'abord s'intéresser à la mesure de la lumière. En effet, si l'expérience empirique du phénomène lumineux est immédiate, sa caractérisation est quant à elle particulièrement complexe, notamment du fait de la dualité onde-corpuscule¹ de la lumière. Il existe donc trois systèmes d'unités (Desvignes, 1997) : énergétique, photonique, lumineuse.
- 7 Le schéma suivant présente le cas de figure le plus simple, avec un unique point lumineux, afin de définir les grandeurs qui nous intéressent. Il est caractérisé par la

position de sa surface émettrice (considéré comme un point x, y, z de l'espace) et l'angle solide (longitudinal et transversal) de l'onde émise.

Figure 1 : grandeurs physiques et mesures associées



Pinçon, 2022

Grandeurs physiques

- 8 Parmi les grandeurs présentées sur la figure 1, nous nous intéressons à :
- l'éclairement, qui est la valeur locale du rapport entre le flux lumineux et l'étendue géométrique. Il s'agit donc d'une valeur ponctuelle en un point donné de la surface réceptrice.
 - la densité surfacique de flux, souvent assimilée à l'éclairement, n'est pas une grandeur du Système International. Elle est la valeur moyenne du rapport du flux lumineux et de la surface éclairée. Elle ne doit pas être confondue avec la densité surfacique de flux lumineux installé (DSFLi), qui est pour sa part une prescription réglementaire².
- 9 Le tableau 1 récapitule les relations entre les différentes grandeurs physiques.

Tableau 1 : unités de mesure

Grandeur	Système d'unités	
	Énergétiques	Lumineuses
Intensité lumineuse	W/sr	candela (cd)
Flux lumineux	W	lumen (lm = cd.sr)
Luminance	W/m ² /sr	cd/m ²
Éclairement	W/m ²	lux (=lm/m ²)
Densité surfacique de flux	W/m ²	lux (=lm/m ²)
Radiance	W/m ² /sr	n/a

Noirceur du ciel nocturne	n/a	mag/arcsec ²
---------------------------	-----	-------------------------

Source : Desvignes, 1997

Méthodes de mesure

- 10 Les méthodes de mesures se divisent en deux familles principales : mesures directes et mesures indirectes. Les mesures directes (en lumière incidente) regroupent intensité lumineuse et éclairage ; dans la pratique, seul l'éclairage est utilisé sur le terrain par les biologistes, l'intensité lumineuse ne pouvant être mesurée qu'en laboratoire. Cependant, la mesure de l'éclairage est très sensible à un déplacement linéaire et/ou angulaire du luxmètre ainsi qu'aux sources parasites (entre autres, présence de la lune et d'un ciel nuageux).
- 11 Contrairement aux mesures directes qui sont des mesures ponctuelles, les mesures indirectes (en lumière réfléchi) prennent en compte la somme des flux lumineux et leurs réflexions visibles de la zone de mesure. Il existe une limite supplémentaire dans le cas de la radiance, celle de la sensibilité spectrale des capteurs (Desvignes, 1997) actuellement embarqués. En effet, ceux-ci ont été développés pour la télédétection de végétation et présentent une sensibilité accrue aux infra-rouges (ce qui surestime les lampes au sodium) tout en étant filtrés dans le bleu (ce qui sous-estime les lampes LED).
- 12 Une méthode différente, développée par le bureau d'études DarkSkyLab depuis 2014, ne vise pas à mesurer la lumière en tant que telle mais à quantifier les sources parasites. Un capteur mesure la noirceur du ciel nocturne tout au long de la nuit sur plusieurs mois. Un traitement statistique permet alors de déterminer la part de chaque source (lune, couvert nuageux, éclairage public, etc.) dans les variations de mesure (Deverchère *et al.*, 2018).
- 13 Abordons enfin la densité surfacique de flux, qui n'est pas *stricto sensu* une méthode de mesure. En effet, elle est le résultat d'un calcul, le rapport du flux lumineux à la surface définie par la distribution photométrique. Néanmoins, ce calcul se faisant en lumière incidente, il présente le meilleur lien avec la mesure d'éclairage. De plus, il fournit une donnée surfacique qui est nécessaire aux outils de modélisation de trames.

Hypothèses

- 14 Dans le cadre de cette étude³, nous formulons trois hypothèses.
- 15 (i) Il est possible de créer une carte d'intensité de l'éclairage à partir des données de gestion de parc ne décrivant que la localisation et un ensemble de caractéristiques des points lumineux, c'est-à-dire générer un ensemble de surfaces différentes à partir de points. (ii) La modélisation d'une surface d'éclairage et l'évaluation de l'intensité lumineuse sur le territoire permet de quantifier l'intensité de la pollution lumineuse. (iii) Enfin, le croisement des surfaces d'intensité lumineuse avec des données environnementales permet de produire un prototype de trame noire pour une espèce animale.
- 16 Valider ou infirmer ces hypothèses nécessite d'établir une typologie des lanternes afin de choisir les graphes photométriques représentatifs des surfaces éclairées observées et transformer la donnée source ponctuelle en une donnée surfacique. La théorie des

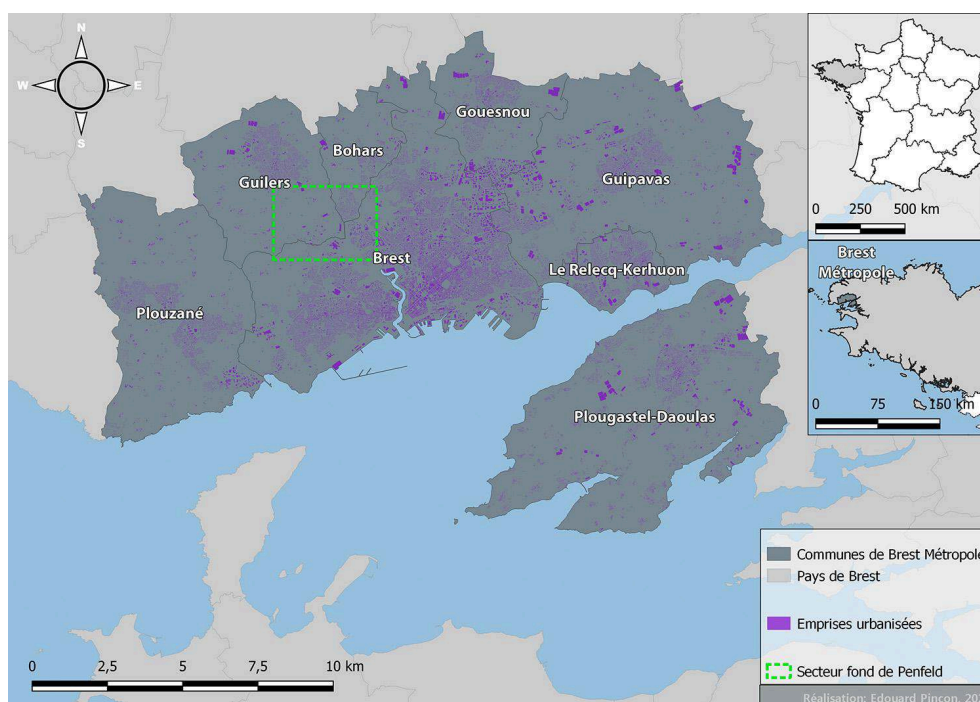
graphes paysagers (Foltête *et al.*, 2021 ; Balbi *et al.*, 2019) est mobilisée ici ; nous retenons une espèce spécifique, *Rhinolophe ferrumequinum*, pour calculer un premier graphe. Un graphe paysager est une représentation simplifiée d'un réseau d'habitats, c'est-à-dire un ensemble de taches d'habitats (nœuds) et leurs connexions potentielles (liens). Son intérêt est de mettre en évidence la distribution spatiale des espèces observées sur de grandes superficies (de la commune à la région). À partir de celui-ci, des métriques de connectivité (De La Barra *et al.*, 2022 ; Keeley *et al.*, 2021) peuvent être calculées pour en caractériser différentes propriétés. Nous avons retenu l'indice de centralité intermédiaire (métrique BC) qui évalue dans quelle mesure une tache ou un lien occupe un rôle central au sein du réseau. Elle permet de déterminer les taches et liens constituant des points de passage obligés. Celle-ci nous intéresse principalement pour sa vocation opérationnelle, c'est-à-dire sa capacité de servir d'outil d'aide à la décision dans les politiques publiques locales, notamment l'élaboration des SCOT et PLU.

Méthodologie de cartographie et de modélisation

Présentation du territoire

- 17 Ce travail exploratoire a été mené en partenariat avec Brest métropole, qui constitue le terrain d'étude (figure 2). Cet EPCI (Établissement Public de Coopération Intercommunale) se compose de huit communes, d'une superficie totale de 21 784 hectares, pour une population de 215 366 habitants (INSEE, 2020). L'extension urbaine reste mesurée, les surfaces artificialisées ne représentant que 32 % de la métropole, avec un maximum de 56 % pour la commune de Brest. Sur le plan environnemental, la métropole est composée de communes littorales traversées par plusieurs fleuves côtiers. L'agriculture est présente jusqu'à la frange urbaine dans sa forme traditionnelle de petites parcelles délimitées par un bocage très marqué ; sur les sept communes du plateau léonard au nord, l'élevage intensif et les cultures fourragères prédominent alors que sur le relief plus marqué de Plougastel-Daoulas, l'élevage extensif en pâturage est en déprise au profit de cultures maraîchères sous serres (dont notamment les fraises).

Figure 2 : territoire d'étude



Pinçon, 2022.

Données mobilisées

- 18 Les données sources sont constituées de *shapefiles* répartis en trois catégories : les surfaces végétalisées propices à la biodiversité, les surfaces bâties qui y font obstacle et les surfaces éclairées (tableau 2).

Tableau 2 : synthèse des données sources

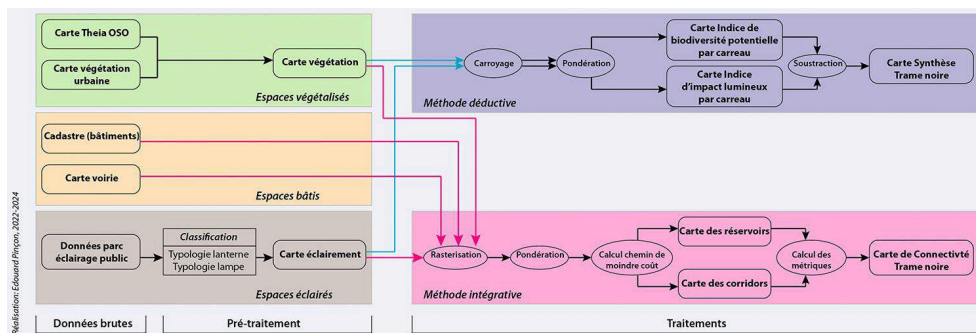
	Donnée	Source	Type de données	Date des données	Spécificité	Traitement
Végétal	Carte d'occupation des sols	OSO Théia	Raster 10 m résolution	Janvier 2020	Couche surfacique créée par télédétection, bien adaptée aux grandes étendues végétales extra-urbaines	Ces deux couches sont regroupées ; leurs classifications étant différentes, elles sont recodées selon les étages de végétation, bas (pelouses et prairies), moyen (buissons et cultures), haut (arbres) plus l'hydrographie (eau)
	Carte de végétation	Trame Verte Urbaine Brest Métropole	Raster 25 cm résolution	Avril 2021	Couche surfacique créée par photo-interprétation, recensant toute la végétation des taches urbaines de la métropole	

Bâti	Emprise des bâtiments	Cadastré	Vecteur	Mars 2021	Couche surfacique de l'ensemble des bâtiments	-
	Emprise des voiries	Open street map	Vecteur	Janvier 2021	Couche linéaire constituée de l'axe médian des voiries, leurs dénomination et types de voies	Une couche surfacique est générée avec quatre largeurs de voies (6 m, 12 m, 18 m, 24 m) selon leur type
Éclairé	Localisation des lampadaires	Brest Métropole	Vecteur	Juillet 2022	Couche ponctuelle répertoriant les 35 984 lampadaires et leurs caractéristiques, dont notamment le type de lanterne et de technologie (57 % de sodium et 33 % de LED)	À partir des types de lanternes, une typologie de forme d'éclairage est créée. Une couche surfacique des surfaces éclairées est générée en associant ces formes et la hauteur des mats ; les valeurs d'éclairage sont pondérées selon la technologie des lampes

Pinçon, 2022

- 19 L'ensemble des données et méthodes de traitement mises en œuvre sont synthétisées sur la figure 3.

Figure 3 : schéma méthodologique résumé



Pinçon, 2022-2024

Cartographier l'éclairage artificiel

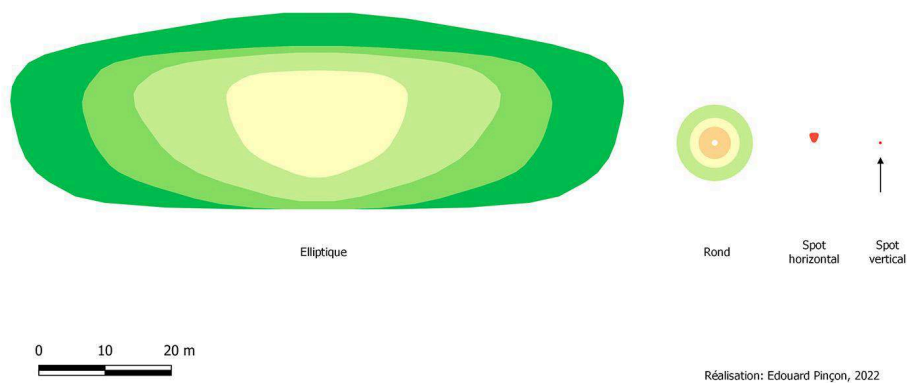
- 20 Le degré de précision requis d'un modèle dépend de l'usage prévu : si celui-ci est purement illustratif, une carte de chaleur de la puissance des luminaires peut suffire ; si

l'objectif est réglementaire, le flux lumineux est considéré comme entièrement focalisé sur la surface de voirie concernée (cas de LightPollutionToolbox)⁴. Dans ces deux cas, des zones tampon (redécoupées ou non) sont créées autour des lampadaires. Ces méthodes, si elles sont simples et rapides, sont trop grossières pour notre objectif, car nous souhaitons pouvoir prédire les valeurs d'éclairage observables sur le terrain.

Modélisation spatiale des zones d'éclairage

- 21 Les données de gestion de parc d'éclairage public ne contiennent que les localisations des lampadaires, c'est-à-dire des points qui, par définition, n'ont ni forme ni orientation.
- 22 En ce qui concerne la forme, les constructeurs de luminaires fournissent des graphes de distribution photométrique. Sur Brest métropole, 592 modèles différents sont installés. Dans ce travail, nous créons donc une typologie synthétique (figure 4) : éclairage routier (forme elliptique), éclairage piéton (forme circulaire), mise en valeur architecturale (spot vertical et spot horizontal). Pour chacun, quatre emprises (valeur maximale d'éclairage, valeur seuillée à 50 %, 10 %, 2 %) sont utilisées pour créer les géométries des surfaces éclairées. La figure 4 illustre les formes représentatives de ces quatre types.

Figure 4 : surface éclairée selon typologie des lanternes



Pinçon, 2022.

- 23 Concernant l'orientation, le postulat de travail est que les luminaires présentant une distribution asymétrique (en particulier l'éclairage routier) visent à produire un éclairage plus large (grand axe de l'ellipse) que profond (petit axe de l'ellipse). Nous retenons ce petit axe comme référence. Les points (emplacement des lampadaires) sont alors projetés perpendiculairement sur l'axe médian des voiries (figure 5) ; l'ensemble point d'origine/point projeté permet alors de calculer l'azimut de chaque lampadaire. Chaque géométrie créée précédemment subit alors une rotation correspondant à son azimut.

Figure 5 : projection des données ponctuelles sur les voiries et détermination de l'azimut



Pinçon, 2022.

- 24 Enfin, nous devons prendre en compte les bâtiments : nous considérons que le flux lumineux s'arrête sur les façades. Pour cela, nous utilisons les données cadastrales pour découper les surfaces créées.

Modélisation des valeurs d'éclairement

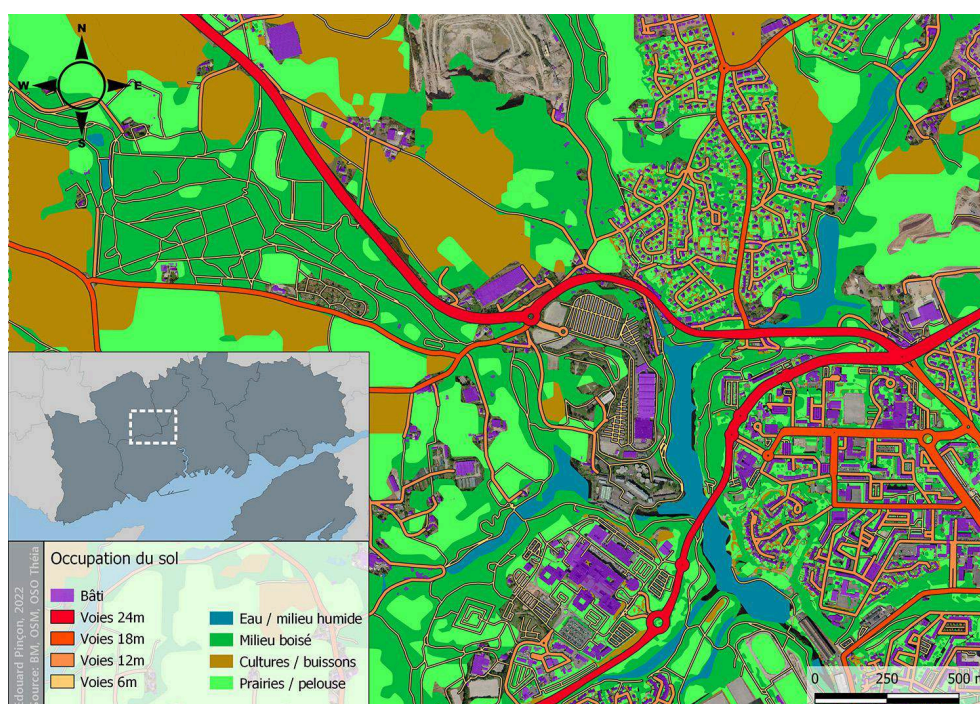
- 25 Cette étape consiste en un simple calcul : le flux lumineux de chaque lampadaire est divisé par la superficie éclairée, modulo valeurs seuils. La valeur du flux lumineux n'est pas toujours renseignée ; dans le cas de Brest métropole, il manque 46 % des valeurs. Nous effectuons une classification des sources lumineuses par technologie (Sodium, LED, Iodure, Halogène, Cosmopolis) en postulant que les rendements au sein de chaque classe sont similaires. Nous pouvons calculer pour chaque classe les corrélations puissance consommée/flux lumineux à partir des données existantes, puis interpoler les valeurs manquantes de flux lumineux à partir de la puissance consommée (donnée toujours présente).
- 26 En complément du résultat brut du calcul des valeurs d'éclairement, nous créons une valeur dérivée incluant un facteur de correction en prévision d'éventuelles divergences entre valeur calculée et valeur mesurée sur le terrain ; ce facteur de correction est également archivé pour chaque lampadaire.

Modéliser une pollution lumineuse et application à la trame noire

- 27 La trame noire est définie comme "un ensemble connecté de réservoirs de biodiversité et de corridors écologiques [ayant] un niveau d'obscurité suffisant pour la biodiversité nocturne" (Sordello et al., 2021, p.19). Il s'agit du pendant nocturne de la trame verte diurne.

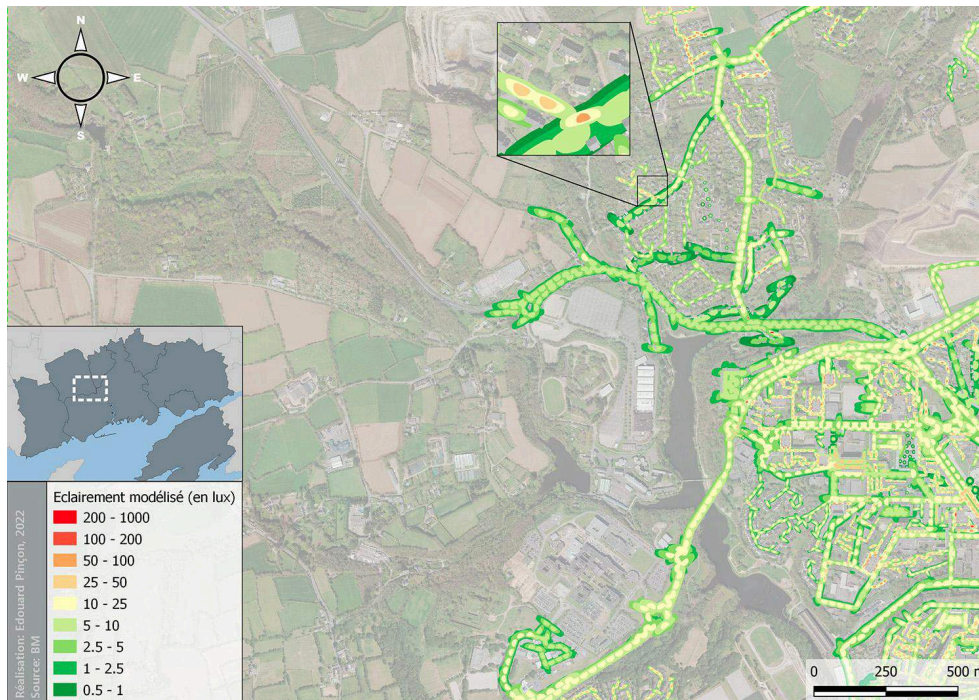
- 28 Deux approches sont proposées pour modéliser la trame noire :
- soustraire la carte de pollution lumineuse de la trame verte existante (méthode dite déductive), la trame noire est alors un sous-ensemble de la trame verte ;
 - prendre en compte la carte de pollution lumineuse parmi les facteurs réduisant la perméabilité du paysage dans les continuités écologiques (méthode dite intégrative).
- 29 Dans tous les cas, il est nécessaire de disposer de données spatialisées des réservoirs de biodiversité et des corridors. Pour cela, nous utilisons une pondération de valeur de biodiversité selon l'occupation du sol (Liénard, Clergeau, 2011).
- 30 Les données sources pour les modèles sont regroupées en deux ensembles : d'une part, l'occupation du sol végétalisé et anthropisé (figure 6) et, d'autre part, l'éclairement modélisé (figure 7).

Figure 6 : catégories d'occupation du sol retenues



Pinçon, 2022.

Figure 7 : modèle d'éclairage (extrait au 27/07/2022)



Une discrétisation Jenks est appliquée aux valeurs d'éclairage ; neuf classes s'avèrent nécessaires, ce qui nous a fait opter pour un dégradé bichromatique. La classe 10-25 lux représente la limite de tolérance des espèces les moins sensibles à la pollution lumineuse.

Pinçon, 2022.

Modèle déductif

- 31 Les données mobilisées sont les cartes de végétation photo-interprétées de Brest métropole pour les taches urbaines, d'occupation du sol Theia OSO (Inglada *et al.*, 2017) pour le reste du territoire (figure 6) et d'éclairage artificiel (figure 7) précédemment créée.
- 32 Pour obtenir une occupation du sol globale et homogène, les deux données source de végétation sont fusionnées et harmonisées puis un carroyage est appliqué (Cerema, 2011) ; une valeur de 250 m de côté est retenue pour les carreaux. Afin de caractériser la contribution potentielle de chaque habitat à la biodiversité, un indice potentiel de biodiversité (Liénard, Clergeau, 2011) est calculé pour chaque carreau :

$$I_{\text{Bio}} = \frac{\sum (\text{surface habitat} \times \text{pondération})}{\sum \text{surfaces habitats}}$$
- 33 Nous utilisons les pondérations établies dans cet article ; elles s'échelonnent de 1 (milieux très favorables, comme les forêts ou lacs de plus d'un hectare) à 0,1 (milieux très défavorables, tels que les carrières ou grandes cultures monospécifiques). Cet indice, sans dimension, permet de comparer la valeur écologique de chaque carreau (figure 9a).
- 34 La même opération est effectuée pour l'éclairage artificiel (figure 9b), à la différence que la pondération est ici inversée : valeur proche de 0 pour les éclairages les plus faibles, valeur proche de 1 pour les éclairages les plus élevés. Cette pollution lumineuse calculée est donc à considérer comme un impact proportionnel à l'éclairage.

- 35 Enfin, pour chaque carreau, l'indice potentiel de biodiversité (I_Bio) est pondéré par l'indice de pollution lumineuse (I_Lux) pour obtenir la trame noire (figure 9c) :

$$I_Trame_noire = I_Bio \times (1 - I_Lux)$$

Modèle intégratif

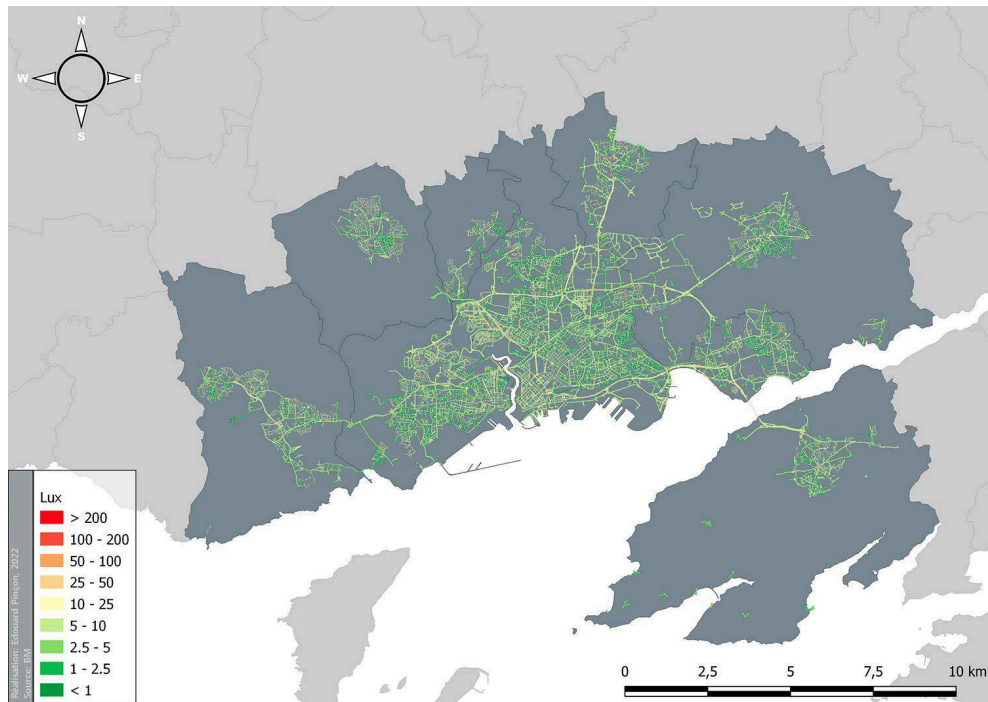
- 36 Ici, en plus des données utilisées précédemment, nous incluons les surfaces bâties, l'emprise des voiries. Nous utilisons les graphes paysagers (Foltête *et al.*, 2021) pour déterminer directement les réservoirs et corridors pour des espèces nocturnes représentatives (Albert, Chaurand, 2018). Nous choisissons *Rhinolophe ferrumequinum* (grand rhinolophe) comme espèce témoin pour les raisons suivantes :

- elle fait partie des espèces retenues dans le cadre des critères de cohérence nationale de la trame verte et bleue (Sordello, 2022). La méthode présentée peut donc facilement être appliquée sur un autre territoire que Brest métropole et à des échelles différentes.
 - elle est très présente en Bretagne et est régulièrement observée sur le territoire de Brest métropole. Nous pouvons donc confronter le modèle avec la réalité de ces observations (Foltête *et al.*, 2019).
 - comme pour l'ensemble des chiroptères en général, la littérature scientifique est abondante (Sordello, 2013). Puisque la détermination des coûts de déplacement se fait à dire d'experts, cette bonne connaissance des traits de vie de l'espèce permet de travailler sur une base solide.
 - ses trajets journaliers sont importants : les estimations varient de 2 à 10 km autour du gîte (Bensettiti, Gaudillat, 2002) jusqu'à 5,5 à 9 km (Groupe mammalogique breton, 2020). Les liens conservés dans le graphe sont donc plus nombreux, permettant ainsi de mieux faire ressortir le réseau de déplacement entre réservoirs. Nous suivons les recommandations de l'INRAE (Papet, Vanpeene, 2020) pour la définition des classes de coûts de déplacement et le choix des métriques.
- 37 À partir de ce graphe paysager, la connectivité peut être caractérisée par des métriques. Nous avons retenu l'indice de centralité intermédiaire (métrique BC) qui évalue dans quelle mesure une tache ou un lien occupe un rôle central au sein du réseau.

Résultats

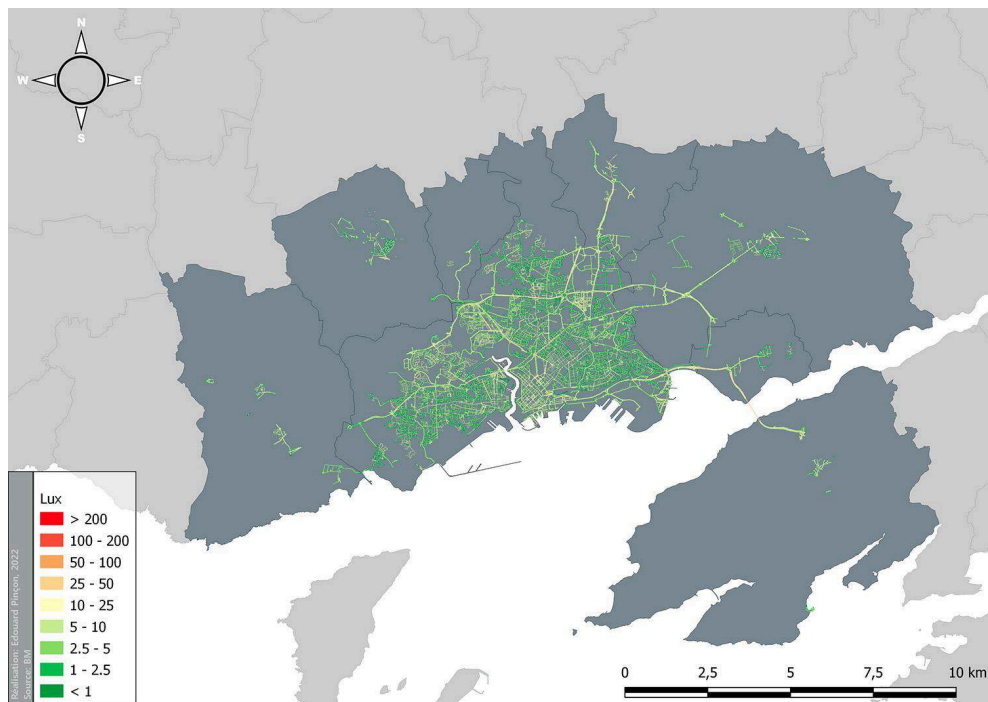
- 38 La carte des surfaces éclairées a été générée dans deux conditions : lorsque le parc est entièrement allumé (du coucher du soleil à 0h30 et de 6h30 au lever du soleil) et en prenant en compte les extinctions et les baisses d'intensité (en cœur de nuit, de 0h30 à 6h30). Ces résultats ont été calculés à partir des données disponibles au 27/07/2022 ; des extinctions et baisses d'intensité plus importantes sont intervenues à partir de novembre 2022 en raison de l'augmentation du coût de l'énergie.

Figure 8a : éclairage complet



Pinçon, 2022

Figure 8b : éclairage partiel



Pinçon, 2022

- 39 Dans la première condition (figure 8a), 2 273 ha sont éclairés (sur les 21 766 que compte la métropole) ; dans la seconde condition (figure 8b), 1 528 ha sont éclairés. Cette variation n'est pas homogène (tableau 3) : il apparaît que ce sont les communes

périphériques qui pratiquent l'extinction alors que Brest se limite plutôt à des baisses d'intensité dans les quartiers résidentiels. Les valeurs d'éclairement les plus élevées diminuent de 75 %, correspondant principalement à la mise en valeur architecturale ; le reste étant constitué de l'éclairage routier des axes et intersections principaux.

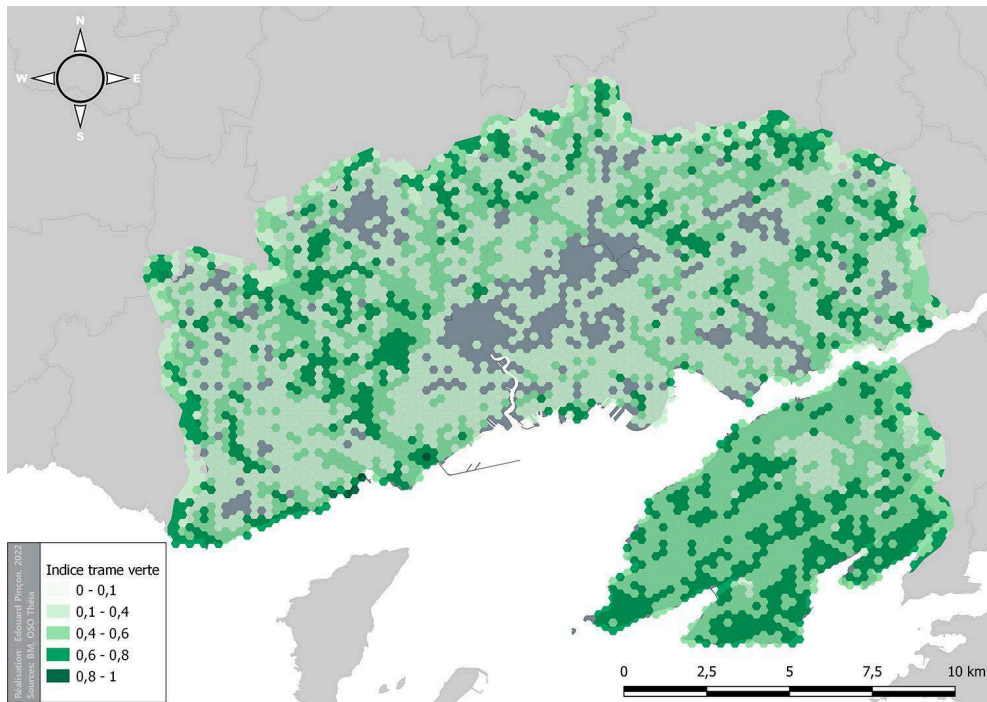
Tableau 3 : superficies éclairées par classes d'éclairement

Éclairage complet			Éclairage partiel		
Classes	Aire (ha)	Aire (%)	Classes	Aire (ha)	Aire (%)
< 1 lux	92,92	4,09 %	< 1 lux	127,55	8,34 %
≥ 1 et < 2,5 lux	442,74	19,48 %	≥ 1 et < 2,5 lux	349,08	22,84 %
≥ 2,5 et < 5 lux	568,86	25,02 %	≥ 2,5 et < 5 lux	458,55	30,00 %
≥ 5 et < 10 lux	612,07	26,93 %	≥ 5 et < 10 lux	341,20	22,32 %
≥ 10 et < 15 lux	283,46	12,47 %	≥ 10 et < 15 lux	124,15	8,12 %
≥ 15 et < 25 lux	181,55	7,99 %	≥ 15 et < 25 lux	98,48	6,44 %
≥ 25 et < 50 lux	82,19	3,62 %	≥ 25 et < 50 lux	27,24	1,78 %
≥ 50 lux	9,42	0,41 %	≥ 50 lux	2,27	0,15 %
Total	2 273,19		Total	1 528,52	

Pinçon, 2022

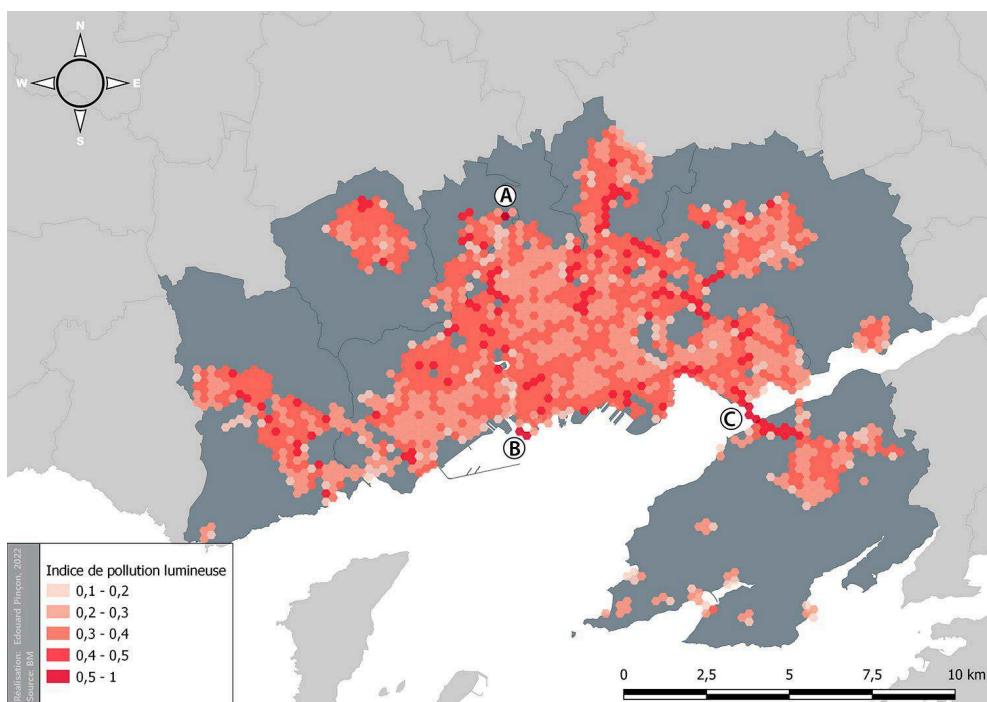
Modèle déductif

Figure 9a : trame verte



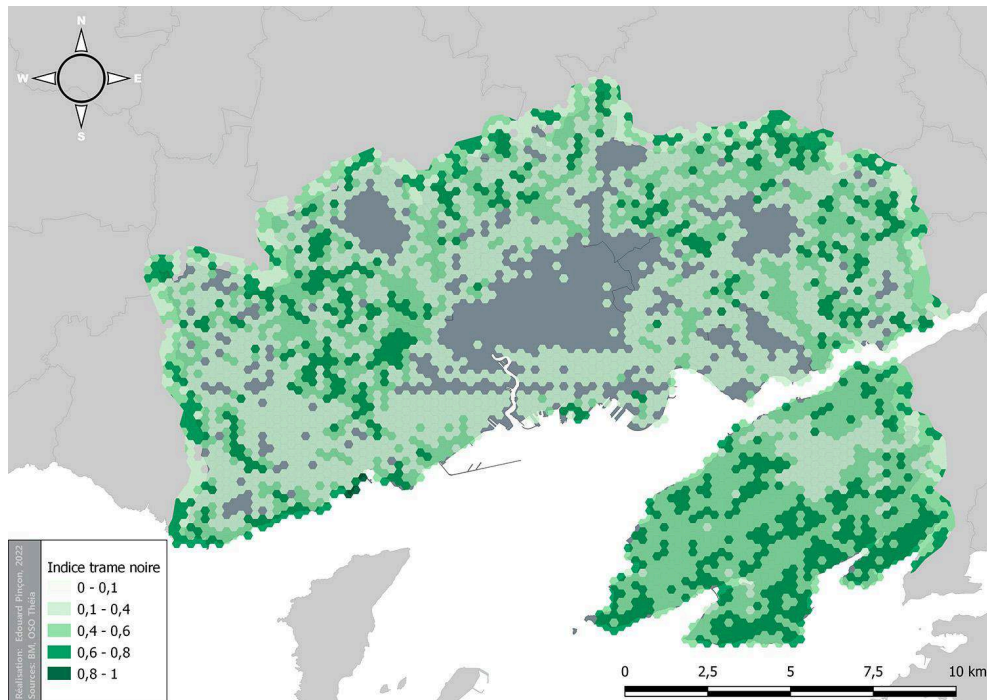
Pinçon, 2022.

Figure 9b : pollution lumineuse



Pinçon, 2022.

Figure 9c : trame noire



Pinçon, 2022.

- 40 Les 3 798 carreaux (tableau 4), dont l'indice de pollution lumineuse est inférieur à 0,1, ont en pratique une valeur nulle et correspondent à l'espace périurbain sans éclairage public. Cet espace regroupe l'ensemble des réservoirs de qualité (indice supérieur à 0,6), de même que l'essentiel des réservoirs de qualité moyenne (indice compris entre 0,4 et 0,6). Sur les taches urbaines, les espaces végétalisés présentent des scores faibles (indice compris entre 0,1 et 0,4) hormis quelques parcs urbains et la frange interstitielle avec l'espace périurbain (indice compris entre 0,4 et 0,6).
- 41 Concernant la pollution lumineuse, les impacts faibles sont localisés sur la périphérie des taches urbaines (indice compris entre 0,1 et 0,2) et sur les quartiers résidentiels (indice compris entre 0,2 et 0,3). Les impacts moyens se situent dans les centre-bourgs, les zones d'activités et les voies de communication (indice compris entre 0,3 et 0,4 ; les voies de communication majeures et leurs intersections ont un indice compris entre 0,4 et 0,5). Les impacts importants (indice supérieur à 0,5) sont concentrés en trois endroits : l'hôpital psychiatrique de Bohars, le port du château et le pont de l'Iroise (Figure9b, repères A, B et C respectivement).
- 42 Les impacts avec des indices supérieurs à 0,3 se retrouvent sur des espaces ayant déjà une qualité faible (cœur de tache urbaine) ou marginalement moyenne (limite urbain-périurbain). Les impacts faibles (indice compris entre 0,1 et 0,3) affectent également cette même limite pour l'essentiel. Les effets sont pourtant notables : en valeurs absolues, les surfaces présentant un intérêt très faible (indice inférieur à 0,1) pour la biodiversité nocturne augmente de 28,3 %, les surfaces avec un intérêt faible (indice compris entre 0,1 et 0,4) diminuent de 1,8 %, les surfaces ayant un intérêt moyen (indice compris entre 0,4 et 0,6) diminuent de 11,5 %, les surfaces de qualité (indice supérieur à 0,6) diminuent de 6,9 %.

Tableau 4 : nombre de carreaux par indice et par classe

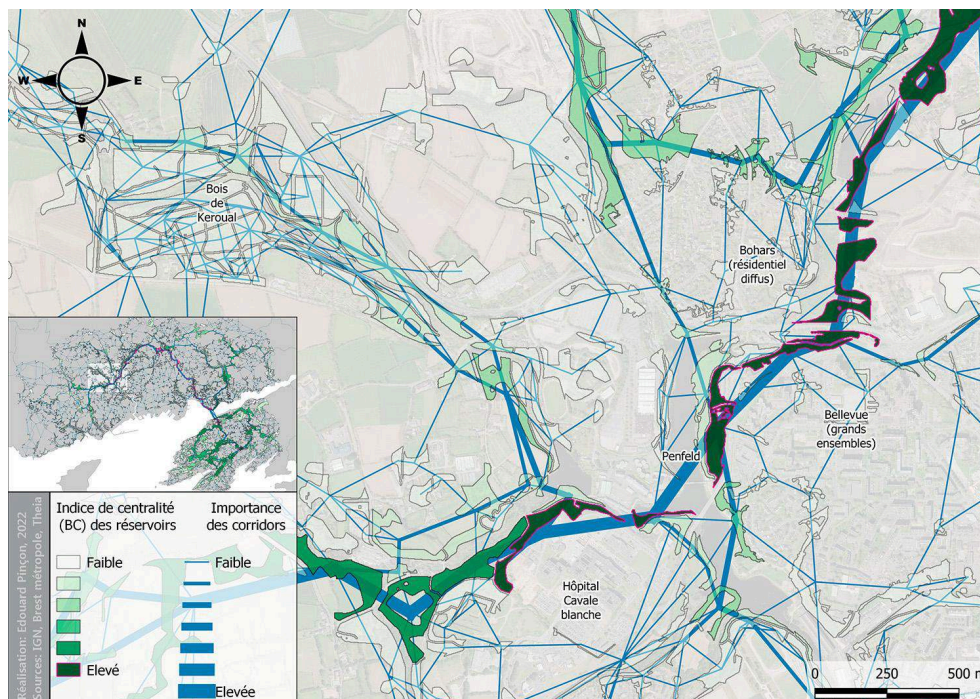
Indice de biodiversité potentielle			Indice de pollution lumineuse			Indice de biodiversité potentielle nocturne			
Indice	Carreaux (nb)	Carreaux (%)	Indice	Carreaux (nb)	Carreaux (%)	Indice	Carreaux (nb)	Carreaux (%)	Variation
< 0,1	985	18,28 %	< 0,1	3 798	70,49 %	< 0,1	1 264	23,46 %	28,32 %
≥ 0,1 et < 0,2	836	15,52 %	≥ 0,1 et < 0,2	124	2,30 %	≥ 0,1 et < 0,2	768	14,25 %	-8,13 %
≥ 0,2 et < 0,3	536	9,95 %	≥ 0,2 et < 0,3	614	11,40 %	≥ 0,2 et < 0,3	591	10,97 %	10,26 %
≥ 0,3 et < 0,4	571	10,60 %	≥ 0,3 et < 0,4	724	13,44 %	≥ 0,3 et < 0,4	548	10,17 %	-4,03 %
≥ 0,4 et < 0,5	669	12,42 %	≥ 0,4 et < 0,5	122	2,26 %	≥ 0,4 et < 0,5	560	10,39 %	-16,29 %
≥ 0,5 et < 0,6	905	16,80 %	≥ 0,5 et < 0,6	2	0,04 %	≥ 0,5 et < 0,6	832	15,44 %	-8,07 %
≥ 0,6 et < 0,7	490	9,09 %	≥ 0,6 et < 0,7	2	0,04 %	≥ 0,6 et < 0,7	461	8,56 %	-5,92 %
≥ 0,7 et < 0,8	290	5,38 %	≥ 0,7 et < 0,8	0	0,00 %	≥ 0,7 et < 0,8	269	4,99 %	-7,24 %
≥ 0,8 et < 0,9	102	1,89 %	≥ 0,8 et < 0,9	0	0,00 %	≥ 0,8 et < 0,9	92	1,71 %	-9,80 %
≥ 0,9	4	0,07 %	≥ 0,9	2	0,04 %	≥ 0,9	3	0,06 %	-25,00 %
Total	5 388		Total	5 388		Total	5 388		

Pinçon, 2022

Modèle intégratif

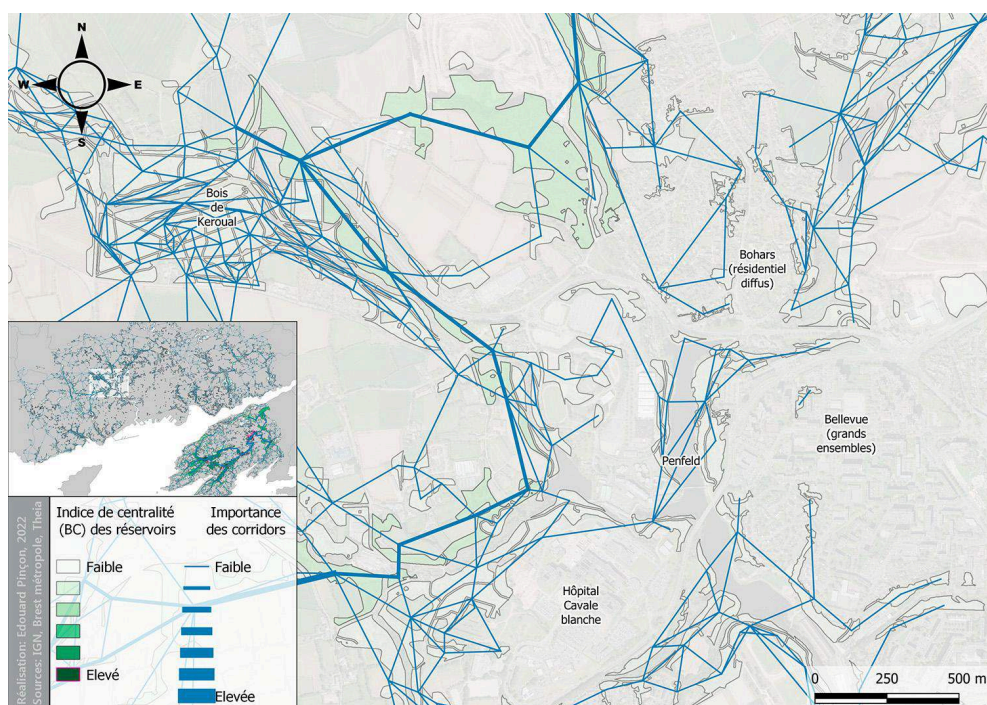
- 43 Le graphe est calculé à l'échelle du territoire complet, il est cependant trop dense en informations pour être décrit entièrement ; nous nous focalisons sur un secteur en limite d'urbanisation, le fond de la Penfeld (figure 5).
- 44 Le graphe de référence (figure 10a) montre un axe majeur de circulation pour les chiroptères, globalement orienté sud-ouest/nord-est. Cet axe suit la vallée d'un affluent de la Penfeld dans la partie occidentale et la vallée de la Penfeld elle-même dans la partie septentrionale. Les réservoirs sont constitués de ripisylves denses jusque sur les flancs de vallées aux dénivelés abrupts ; cette topologie explique la qualité de ces espaces en limitant son anthropisation.
- 45 Nous pouvons également observer deux axes secondaires : l'un partant de l'axe principal vers le nord-ouest, en direction du bois de Keroual et un autre traversant Bohars au nord d'un quartier pavillonnaire déconnecté du centre-bourg.
- 46 Le graphe prenant en compte l'éclairage public (figure 10b) met en évidence son impact sur la connectivité : l'axe majeur disparaît quasiment le long de la vallée de la Penfeld puisque ses réservoirs se retrouvent isolés. Des niveaux d'éclaircements élevés (figure 6) sont présents le long des voiries principales que sont l'avenue Le Gorgeu (10 à 20 lux) et le boulevard de l'Europe (20 lux), au niveau de l'hôpital Cavale blanche et sur Bellevue (30 lux). Dans ce dernier cas, il s'agit d'un quartier prioritaire de la ville (QPV), cet éclairage répond à un besoin de sécurité (Mosser, 2007).
- 47 L'axe secondaire se réorganise, suivant la vallée de l'affluent de la Penfeld puis remontant vers le bois de Keroual avant de rejoindre l'arrière-pays de Bohars.

Figure 10a : graphe paysager chiroptère de référence (ne prenant pas en compte l'éclairage public)



Pinçon, 2022.

Figure 10b : graphe paysager chiroptère modélisé (prenant en compte l'éclairage public)



Pinçon, 2022.

Discussion

Création d'une carte d'intensité de l'éclairage à partir des données de gestion de parc

- 48 Le travail préparatoire de classification des points lumineux (typologie) a permis de déterminer les surfaces éclairées sur quatre niveaux d'intensité ; l'interpolation des données manquantes concernant les valeurs de flux lumineux a permis d'attribuer des valeurs cohérentes aux surfaces éclairées. Nous aboutissons donc à une carte d'intensité d'éclairage sur le territoire. Elle est plus précise que les modèles courants (comme LightPollutionToolbox) qui considère que la surface à éclairer l'est de manière complète et uniforme. Cependant, la distinction fondamentale entre éclairage et densité surfacique de flux fait que notre modèle reste une approximation, d'autant plus que la géométrie de flux utilise un modèle moyen alors que les luminaires (en particulier routiers) ont une grande variété de géométrie.
- 49 En pratique, cette limite est peu gênante lorsque nous utilisons le modèle à l'échelle du territoire de Brest métropole puisque la différence dans les surfaces éclairées est négligeable par rapport à sa superficie ; lorsqu'il s'agit de prédire le gradient d'éclairage d'un transect sur un terrain d'étude de quelques dizaines de mètres carrés, quatre niveaux ne sont plus suffisants.

Caractérisation de la pollution lumineuse sur le territoire

- 50 Nous pouvons considérer que les densités surfaciques de flux lumineux seuillés calculés correspondent à la moyenne des valeurs d'éclairage au sein de chacune de ces surfaces. Des écarts peuvent apparaître entre les densités calculées et les moyennes issues notamment des simulations des études d'éclairage lors de l'installation de nouveaux luminaires et de mesures de terrain. L'interpolation des valeurs de flux lumineux manquantes en est la cause principale. C'est pourquoi un facteur de correction a été intégré ; par défaut, il est ajusté en fonction de la technologie de la lampe. Il peut également être affiné au cas par cas, sur un terrain d'étude particulier par exemple.
- 51 Ce choix permet de conserver la cohérence d'ensemble des valeurs tout en évaluant au mieux l'intensité lumineuse à l'échelle la plus locale. Autrement dit, cette pondération précise la pollution lumineuse issue de l'éclairage public afin d'évaluer son impact.

Production d'un prototype de trame noire

- 52 Les graphes paysagers doivent être calculés pour une espèce donnée car les coûts de déplacements utilisés pour le calcul représentent le gradient de facilité pour ladite espèce à traverser un milieu donné (Foltête, 2012). Nous avons choisi l'espèce *Rhinolophe ferrumequinum* (grand rhinolophe). Les barrières écologiques déjà connues pour le grand rhinolophe sur le territoire de Brest métropole sont bien visibles dans le modèle généré, ce qui confirme sa pertinence. L'intérêt est de mettre en évidence de petits réservoirs jouant un rôle clef dans le réseau (corridor en pas japonais) mais difficile à repérer sur le terrain (Tarabon *et al.*, 2019).
- 53 Cette démarche peut facilement être affinée en calculant des graphes pour d'autres espèces et en déterminant les réservoirs communs à plusieurs espèces, ce qui identifie des espaces stratégiques multifonctionnels (Clauzel *et al.*, 2018).
- 54 Enfin, ce modèle peut être intégré à une échelle plus large puisqu'il s'appuie largement sur les données d'occupation du sol pour représenter la connectivité fonctionnelle des réseaux (Clauzel, Bonnevalle, 2019), bien que dans ce cas la corrélation entre le modèle et les observations soient plus délicate à établir pour les liens les plus faibles (Bourdouxhe *et al.*, 2020).
- 55 Globalement, les hypothèses de départ sont vérifiées. Plusieurs limites apparaissent cependant, la principale étant la dualité entre éclairage (qui est une donnée ponctuelle) et densité surfacique de flux lumineux (qui est une donnée surfacique). Or, les méthodes utilisées pour modéliser la trame noire nécessitent une donnée surfacique alors que les biologistes se servent de données ponctuelles pour caractériser leurs milieux d'études (Pauwells *et al.*, 2021).
- 56 Une seconde limite importante concerne les niveaux calculés : nous pouvons estimer que les valeurs moyennes (grossièrement entre 10 et 100 lux) sont proches des valeurs réelles mais que la marge d'erreur s'accroît significativement pour les valeurs les plus basses. Le modèle fonctionne bien pour des espèces relativement peu sensibles, comme les chiroptères, qui ont un seuil entre 20 et 30 lux (Gaston *et al.*, 2013) ; en revanche, pour les espèces les plus sensibles, comme *Strix varia* qui a un seuil de $1,6 \cdot 10^{-6}$ lux, nous ne disposons pas d'une telle précision.

- 57 Enfin, notre modèle ne prend en compte que l'éclairement au sol et est plutôt adapté à l'évaluation des impacts sur la faune, alors que la flore subit également des effets négatifs comme des perturbations des cycles de croissance (Ffrench-Constant *et al.*, 2016). L'intégration de modèles numériques d'élévation et de surface permettrait de calculer la hauteur de la végétation et d'en déterminer les surfaces impactées. Cet ajout déterminerait également les zones d'ombre plus favorables situées en dessous des canopées éclairées (Pauwells *et al.*, 2019).

Conclusion

- 58 Notre méthode explore une approche peu développée : en effet, lors de la construction des indicateurs nationaux de pollution lumineuse (Sordello *et al.*, 2018), l'usage des données de gestion d'éclairage public est évoqué mais n'est pas encouragé car celles-ci sont incomplètes au plan national. Notre objectif a donc été d'exploiter au mieux ces données pour établir un modèle pertinent dans une démarche scientifique et opérationnelle et produire une cartographie avec une gradation de niveaux d'éclairement.
- 59 Ces données sont incomplètes à plus d'un titre : d'une part, bien que rendues obligatoires par l'arrêté du 27/12/2018, les valeurs de flux lumineux notamment ne sont dans la pratique pas toujours renseignées par le gestionnaire (surtout pour les luminaires les plus anciens). Une interpolation des valeurs manquantes par classe de technologie a néanmoins abouti à une bonne corrélation. D'autre part, l'éclairage public ne constitue qu'une partie de l'éclairage artificiel nocturne (ALAN) ; par exemple, sur les photos satellite de Brest métropole, de très grandes serres agricoles montrent une radiance très supérieure à celle du centre ville. Cependant, dans un cadre opérationnel, la métropole peut facilement intervenir sur l'éclairage public et sa modélisation permet d'établir une synthèse des zones à enjeux à l'échelle du territoire entier, constituant de ce fait un puissant levier d'action.
- 60 Une fois les données prétraitées, le calcul de la cartographie des niveaux d'éclairement est un processus simple et rapide. Cette cartographie a alors montré une bonne souplesse d'usage : deux modèles de trame noire ont pu être générés sur cette base commune. La trame noire issue de la méthode déductive a permis de produire un document de synthèse, exploitable à l'échelle de la métropole et principalement orienté sur la qualité des réservoirs ; celle issue de la méthode intégrative est plutôt axée sur les connexions entre réservoirs. Elle permet d'étudier la structure des corridors à l'échelle de la métropole, mais aussi de repérer de petits réservoirs ponctuels importants pour le réseau à une échelle beaucoup plus fine qui pourrait être la cible d'opérations de diminution d'éclairage.
- 61 Ainsi, la force et l'originalité de notre approche est de s'appuyer sur des données a priori peu adaptées, les données de gestion de parc d'éclairage. La réflexion a principalement porté sur le pré-traitement de celles-ci afin d'en extraire toutes les informations pertinentes, ce qui a permis de parvenir à des modèles assez précis pour un usage scientifique. Par ailleurs, la méthode reste simple, ce qui la rend utilisable dans un cadre opérationnel ; nous avons donc ici une méthode hybride et fournissant un outil supplémentaire pour l'étude de la trame noire.

BIBLIOGRAPHIE

- Albert C., Chaurand J., 2018, "Comment choisir les espèces pour identifier des réseaux écologiques cohérents entre les niveaux administratifs et les niveaux biologiques ?", *Sciences Eaux & Territoires*, No.25, [en ligne]. URL : <https://hal.science/hal-01830533/document>
- Arrêté du 27 décembre 2018 relatif à la prévention, à la réduction et à la limitation des nuisances lumineuses, 2018, *Environnement*, No.0300, [en ligne]. URL : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000037864346/>
- Balbi M., Petit E.J., Croci S., Nabucet J., Georges R., Madec L. *et al.*, 2019, "Ecological relevance of least cost path analysis: An easy implementation method for landscape urban planning", *Journal of Environmental Management*, Vol.244, 61-68.
- Bensettiti F., Gaudillat V., 2002, « Cahiers d'habitats » Natura 2000. *Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire*, Tome 7, Espèces animales, [en ligne]. URL : <https://inpn.mnhn.fr/telechargement/documentation/natura2000/cahiers-habitats>
- Bourdouxhe A., Duflo R., Radoux J., Dufrêne M., 2020, "Comparison of methods to model species habitat networks for decision-making in nature conservation: The case of the wildcat in southern Belgium", *Journal for Nature Conservation*, Vol.58, 125901.
- Calabrese J.M., Fagan W.F., 2004, "A comparison-shopper's guide to connectivity metrics", *Frontiers in Ecology and the Environment*, Vol.2, No.10, 529-536.
- Carte d'occupation des sols de la France métropolitaine, Theia, 2022, [en ligne]. URL : <https://www.theia-land.fr/product/carte-doccupation-des-sols-de-la-france-metropolitaine/>
- Cerema., 2022, "Aménagement, urbanisme, biodiversité, éclairage : une série de fiches pratiques pour les différents acteurs", *Cerema*, [en ligne]. URL : <http://www.cerema.fr/fr/actualites/amenagement-urbanisme-biodiversite-eclairage-serie-fiches>
- Cerema., 2022, "Traitements géomatiques par carreaux pour l'observation des territoires", *Cerema*, [en ligne]. URL : <http://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/traitements-geomatiques-carreaux-observation-territoires>
- Challéat S., 2010, « Sauver la nuit » : *empreinte lumineuse, urbanisme et gouvernance des territoires*, Dijon, 548 p., [en ligne]. URL : <https://www.theses.fr/2010DIJOL016>
- Clauzel C., Bonnevalle C., 2019, "Apports de la modélisation spatiale pour la gestion de la trame verte et bleue", *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://journals.openedition.org/cybergeo/32333>
- Clauzel C., Jeliakov A., Mimet A., 2018, "Coupling a landscape-based approach and graph theory to maximize multispecific connectivity in bird communities", *Landscape and Urban Planning*, Vol. 179, 1-16.
- Davies T.W., Smyth T., 2018, "Why artificial light at night should be a focus for global change research in the 21st century", *Global Change Biology*, Vol.24, No.3, 872-882.
- Ffrench-Constant R.H., Somers-Yeates R., Bennie J., Economou T., Hodgson D., Spalding A. *et al.*, 2016, "Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom", *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol.283, No.1833, 20160813.

- Cormier L., Lajartre A.B.D., Carcaud N., 2010, "La planification des trames vertes, du global au local : réalités et limites", *Cybergeo: European Journal of Geography*, [en ligne]. URL : <https://journals.openedition.org/cybergeo/23187>
- Cunha A.D., 2015, "Nouvelle écologie urbaine et urbanisme durable. De l'impératif écologique à la qualité urbaine", *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, No.65, 22.
- Dansereau P., 1957, *Biogeography: an ecological perspective*, New York, Ronald Press Company.
- De La Barra F., Alignier A., Reyes-Paecke S., Duane A., Miranda M.D., 2022, "Selecting Graph Metrics with Ecological Significance for Deepening Landscape Characterization: Review and Applications", *Land*, Vol.11, No.3, 338.
- Desvignes F., 1997, *Rayonnements optiques : radiométrie, photométrie*, Paris Milan Barcelone, Masson.
- Deverchère P., Vauclair S., Bonavitacola M., 2018, *Mesure et modélisation de la pollution lumineuse*, DarkSkyLab, 8.
- Dominoni D., Nelson R., 2018, "Artificial light at night as an environmental pollutant: An integrative approach across taxa, biological functions, and scientific disciplines", *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology*, Vol.329, 387-393.
- Dunlap J.C., 1999, "Molecular Bases for Circadian Clocks", *Cell*, Vol.96, No.2, 271-290.
- Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba C.C. M., Elvidge C.D., Baugh K. *et al.*, 2016, "The new world atlas of artificial night sky brightness", *Science Advances*, Vol.2, No.6.
- Foltête J.C., Clauzel C., Vuidel G., 2012, "A software tool dedicated to the modelling of landscape networks", *Environmental Modelling & Software*, Vol.38, 316-327.
- Foltête J.C., Savary P., Clauzel C., Bourgeois M., Sahraoui Y., Vuidel G. *et al.*, 2019, "Graphes paysagers et données de terrain sur les espèces : quelles stratégies de couplage ?", [en ligne]. URL : <https://www.ubfc.fr/wp-content/uploads/2019/05/2019-SV2TEA-Atelier-Pubprivland-W3-FOLTETE.pdf>
- Foltête J.C., Vuidel G., Savary P., Clauzel C., Sahraoui Y., Girardet X. *et al.*, 2021, "Graphab: An application for modeling and managing ecological habitat networks", *Software Impacts*, Vol.8, 100065.
- Gaston K.J., Bennie J., Davies T.W., Hopkins J., 2013, "The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal", *Biological Reviews*, Vol.88, No.4, 912-927.
- Gaston K.J., Davies T.W., Bennie J., Hopkins J., 2012, "REVIEW: Reducing the ecological consequences of night-time light pollution: options and developments", *Journal of Applied Ecology*, Vol.49, No.6, 1256-1266.
- Gmb., 2020, "Fiches Trame Mammifères de Bretagne-3.4 Grand rhinolophe", *Groupe mammalogique breton*, [en ligne]. URL : https://geobretagne.fr/pub/gp-mammalogique/2020-GMB-FichesTMB-3.4_Grand_rhinolophe.pdf
- Hölker F., Wolter C., Perkin E.K., Tockner K., 2010, "Light pollution as a biodiversity threat", *Trends in Ecology & Evolution*, Vol.25, No.12, 681-682.
- Inglada J., Vincent A., Arias M., Tardy B., Morin D., Rodes I., 2017, "Operational High Resolution Land Cover Map Production at the Country Scale Using Satellite Image Time Series", *Remote Sensing*, Vol.9, 95.
- Keeley A.T.H., Beier P., Jenness J.S., 2021, "Connectivity metrics for conservation planning and monitoring", *Biological Conservation*, Vol.255, 109008.

- Lao S., Robertson B.A., Anderson A.W., Blair R.B., Eckles J.W., Turner R.J. *et al.*, 2020, "The influence of artificial night at night and polarized light on bird-building collisions", *Biological Conservation*, Vol.241, No.108358, [en ligne]. URL : <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=85075513725&partnerID=8YFLogxK>
- Liénard S., Clergeau P., 2011, "Trame Verte et Bleue : Utilisation des cartes d'occupation du sol pour une première approche qualitative de la biodiversité", *Cybergeo: European Journal of Geography*, [en ligne]. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/23494>
- Longcore T., Rich C., 2016, "Ecological and Organismic Effects of Light Pollution", *eLS*, John Wiley & Sons, Ltd, 1-8, [en ligne]. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470015902.a0026328>
- Mena J.L., Rivero J., Bonifaz E., Pastor P., Pacheco J., Aide T.M., 2022, "The effect of artificial light on bat richness and nocturnal soundscapes along an urbanization gradient in an arid landscape of central Peru", *Urban Ecosystems*, Vol.25, No.2, 563-574.
- Muséum national d'Histoire naturelle, 2022, *Synthèses bibliographiques sur les traits de vie de 39 espèces proposées pour la cohérence nationale de la Trame verte et bleue relatifs à leurs déplacements et besoins de continuité écologique | Trame verte et bleue*, Muséum national d'Histoire naturelle, [en ligne]. URL : <http://trameverteetbleue.fr/documentation/references-bibliographiques/syntheses-bibliographiques-sur-traits-vie-39-especes>
- Muséum national d'Histoire naturelle, 2022, *Trame verte et bleue - Critères nationaux de cohérence - Contribution à la définition du critère sur les espèces | Trame verte et bleue*, Muséum national d'Histoire naturelle, [en ligne]. URL : <http://trameverteetbleue.fr/documentation/references-bibliographiques/trame-verte-bleue-criteres-nationaux-coherence>
- Muséum national d'Histoire naturelle, 2022, *Trame verte et bleue - Critères nationaux de cohérence - Contribution à la définition du critère sur les habitats | Trame verte et bleue*, Muséum national d'Histoire naturelle, [en ligne]. URL : <http://trameverteetbleue.fr/documentation/references-bibliographiques/trame-verte-bleue-criteres-nationaux-coherence-0>
- Mosser S., 2007, "Éclairage et sécurité en ville : l'état des savoirs", *Déviance et Société*, Vol.31, No.1, 77-100.
- Ome L., 2023, *L'intégration de la biodiversité dans les politiques publiques locales*, 125 p.
- "OpenObs - Requêteur national des données biodiversité", 2022, *Portail français d'accès aux données d'observation sur les espèces*, [en ligne]. URL : <https://openobs.mnhn.fr/>
- Papet G., Vanpeene S., 2020, "Graphes Paysagers et séquence ERC", *Centre de ressources Trame verte et bleue*, 22 p.
- Pauwels J., Le Viol I., Azam C., Valet N., Julien J.F., Bas Y. *et al.*, 2019, "Accounting for artificial light impact on bat activity for a biodiversity-friendly urban planning", *Landscape and Urban Planning*, Vol.183, 12-25.
- Pauwels J., Le Viol I., Bas Y., Valet N., Kerbirou C., 2021, "Adapting street lighting to limit light pollution's impacts on bats", *Global Ecology and Conservation*, Vol.28, e01648.
- Pinçon E., Barbier M., Durthaller-Renard C., Laftouhi Y., Launay V., Renault A., 2021, *Atelier Trame Verte Urbaine 2020-2021*, addendum méthodologique, Institut de Géoarchitecture.
- Ramade F., 2022, *Éléments d'écologie : Écologie appliquée*, Ed. 7, Dunod, [en ligne]. URL : <https://univ-scholarvox-com.scd-proxy.univ-brest.fr/book/88926847>

Segrestin J., Mondy N., Boisselet C., Guigard L., Lengagne T., Poussineau S. *et al.*, 2021, "Effects of artificial light at night on the leaf functional traits of freshwater plants", *Freshwater Biology*, Vol. 66, No.12, 2264-2271.

Sordello R., 2017, "Pistes méthodologiques pour prendre en compte la pollution lumineuse dans les réseaux écologiques", *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol.17, No.3, [en ligne]. URL : <https://journals.openedition.org/vertigo/18730>

Sordello R., Azam C., Amsallem J., Bas Y., Billon L., Busson S. *et al.*, 2018, *Réflexion préliminaire à la définition d'indicateurs nationaux sur la pollution lumineuse*, PatriNat (AFB-CNRS-MNHN), 47 p., [en ligne]. URL : <https://mnhn.hal.science/mnhn-04273532>

Sordello R., Busson S., Cornuau J.H., Deverchère P., Faure B., Guetté A. *et al.*, 2022, "A plea for a worldwide development of dark infrastructure for biodiversity – Practical examples and ways to go forward", *Landscape and Urban Planning*, Vol.219, 104332.

Sordello R., Paquier F., Daloz A., 2021, "Trame noire - Méthodes d'élaboration et outils pour sa mise en oeuvre", *Le portail technique de l'OFB*, [en ligne]. URL : <https://professionnels.ofb.fr/fr/doc-comprendre-agir/trame-noire-methodes-delaboration-outils-mise-en-oeuvre>

Stratégie nationale biodiversité 2030, [en ligne]. URL : <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/strategie-nationale-biodiversite-2030>

Tarabon S., Bergès L., Dutoit T., Isselin-Nondedeu F., 2019a, "Environmental impact assessment of development projects improved by merging species distribution and habitat connectivity modelling", *Journal of Environmental Management*, Vol.241, 439-449.

Tarabon S., Bergès L., Dutoit T., Isselin-Nondedeu F., 2019b, "Maximizing habitat connectivity in the mitigation hierarchy. A case study on three terrestrial mammals in an urban environment", *Journal of Environmental Management*, Vol.243, 340-349.

Tarabon S., Calvet C., Delbar V., Dutoit T., Isselin-Nondedeu F., 2020, "Integrating a landscape connectivity approach into mitigation hierarchy planning by anticipating urban dynamics", *Landscape and Urban Planning*, Vol.202, 103871.

NOTES

1. En physique, un objet possède soit une propriété ondulatoire (définie par la longueur d'onde, comme par exemple pour le WiFi, la 4G, etc.), soit une propriété corpusculaire (définie comme une particule élémentaire, comme par exemple un électron, un photon, etc.). La lumière possède ces deux propriétés contradictoires ; cette observation est à l'origine de la physique quantique.

2. [En ligne]. URL : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000037864346/>

3. Cette étude expérimentale a été menée dans le cadre de la chaire universitaire Noz Breizh. [En ligne]. URL : <https://www.univ-brest.fr/chaire-noz-breizh/fr>

4. [En ligne]. URL : <https://umr-tetis.fr/index.php/fr/productions-fr/outils/lightpollutiontoolbox>

RÉSUMÉS

Alors que les impacts anthropiques sur la biodiversité urbaine et péri-urbaine sont étudiés depuis au moins cinquante ans, les effets de la pollution par l'éclairage artificiel sur la biodiversité nocturne par les politiques publiques est moins explorée. Cet article présente une cartographie des surfaces éclairées sur le territoire de Brest métropole, fondée sur les données de gestion du parc d'éclairage public, et son croisement avec les données d'occupation du sol pour construire un modèle de trame noire. La cartographie est d'abord générée en combinant une typologie des distributions photométriques avec les valeurs de flux lumineux. Puis, le modèle est construit par le calcul d'indices de biodiversité carroyés (méthode déductive) et par le calcul de graphes paysagers (méthode intégrative) expérimenté sur une espèce de chauve-souris. Un facteur de correction est intégré afin de permettre d'affiner le modèle par des mesures de terrain. Les résultats obtenus montrent que la cartographie est conforme aux observations de terrain et que la représentation des valeurs d'éclairage est cohérente. Le modèle de trame noire obtenue conforte la connaissance préexistante. Ce modèle est suffisamment précis pour repérer de potentielles zones à enjeu pour la faune et fournir des outils d'aide à la décision pour l'aménagement du territoire.

While anthropogenic impacts on urban and peri-urban biodiversity have been studied for at least fifty years, the effects of artificial lighting pollution on nocturnal biodiversity through public policies has been less explored. This article presents a map of lit surfaces in the Brest metropolitan area, based on public lighting management data, and its cross-referencing with land-use data to build a dark frame model. Mapping is first generated by combining a typology of photometric distributions with luminous flux values. Then, the model is built by calculating gridded biodiversity indices (deductive method) and landscape graphs (integrative method), tested on a bat species. A correction factor is incorporated to enable the model to be refined by field measurements. The results obtained show that the mapping is consistent with field observations and that the representation of illumination values is coherent. The dark frame model obtained reinforces pre-existing knowledge. The model is sufficiently accurate to identify potential wildlife hotspots and provide decision-making tools for land-use planning.

Si bien los impactos antropogénicos sobre la biodiversidad urbana y periurbana se han estudiado durante al menos cincuenta años, los efectos de la contaminación lumínica sobre la biodiversidad nocturna por las políticas públicas han sido menos explorados. Este artículo propone una cartografía de superficies iluminadas en el territorio de la metrópolis de Brest, a partir de datos de gestión del parque de alumbrado público, y el cruce de estos con el uso del suelo, construyendo así un modelo de trama negra/oscura. Para elaborar la cartografía, en un primer momento se combina una tipología de distribuciones fotométricas con los valores de flujo luminoso. Posteriormente, se construye un modelo calculando índices de biodiversidad cuadrículados (método deductivo) y grafos de paisaje (método integrativo) aplicados a una especie de murciélago. Se integra un factor de corrección para permitir que el modelo sea pulido utilizando mediciones en terreno. Los resultados obtenidos expresan que la cartografía es consistente con las observaciones de campo y que la representación de los valores del nivel de iluminación es consistente. El modelo de trama negra/oscura propuesto, refuerza los conocimientos preexistentes y es lo suficientemente preciso para identificar áreas potenciales y desafíos de interés para la fauna, proporcionado así herramientas para la toma de decisiones en el marco del ordenamiento territorial

INDEX

Palabras claves : noche, contaminación, ecología urbana, SIG, modelización

Mots-clés : nuit, pollution, écologie urbaine, SIG, modélisation

Keywords : night, pollution, urban ecology, GIS, modeling

geographyun 908, 926, 250

AUTEURS

EDOUARD PINÇON

Ingénieur d'études, Univ Brest, Laboratoire Géoarchitecture. Territoires, urbanisation, biodiversité, environnement, France, edouard.pincon@laposte.net

JÉRÔME SAWTSCHUK

Maître de conférences, Univ Brest, Laboratoire d'Études et Recherche en Sociologie, UR 3149, France jerome.sawtschuk@univ-brest.fr

EDNA HERNÁNDEZ GONZÁLEZ

Maîtresse de conférences, Univ Brest, Laboratoire Géoarchitecture. Territoires, urbanisation, biodiversité, environnement, France, edna.hernandezgonzalez@univ-brest.fr