

Université de Toulouse II
Département de Géographie, Aménagement, Environnement et Développement
Master 2 GAED option GEMO
UE 1001 Stage professionnel
Année 2023/2024

**"Optimisation des Techniques de Mesure de la Pollution Lumineuse :
Complémentarité des Données Satellitaires et de Terrain"**

Responsable pédagogique :

Samuel Challéat

Maîtres de stage :

Eric Maire

Grzegorz Skupinski

Guillaume Yléann

N° : 22202596

Remerciements

Je souhaite particulièrement remercier mes encadrants, Eric Maire et Grzegorz Skupinski, pour leur encadrement précieux, leur expertise et leurs conseils tout au long de ce stage. Leur disponibilité et leurs encouragements ont été déterminants dans l'aboutissement de ce travail.

Je remercie également l'Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC) pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce stage dans un cadre de recherche aussi enrichissant et stimulant. Mes remerciements s'adressent également à la Zone Atelier de l'Eurométropole de Strasbourg (ZAEU).

Je remercie également toute l'équipe du Laboratoire Image, Ville, Environnement (LIVE) de l'Université de Strasbourg pour l'accueil chaleureux et l'environnement de travail offert.

Je suis reconnaissant envers les collaborateurs notamment liés au projet EvolVille pour la richesse des échanges et des collaborations et leur soutien dans le cadre de ce projet.

Enfin, je remercie toutes les personnes, chercheurs, techniciens, et personnels administratifs et famille qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce stage. Leur aide et leur soutien m'ont été d'une grande valeur.

Résumé

La pollution lumineuse à Strasbourg, comme dans de nombreuses villes modernes, est un phénomène croissant causé par l'éclairage artificiel nocturne. Cette pollution se manifeste par des émissions lumineuses mal dirigées, une sur-illumination et l'utilisation de lumières nocives, telles que celles émettant dans les courtes longueurs d'onde (lumière bleue). Ces pratiques créent des "dômes lumineux" visibles dans le ciel nocturne urbain, affectant les écosystèmes locaux, modifiant les comportements de la faune nocturne, comme les oiseaux migrateurs et les insectes pollinisateurs. De plus, l'exposition à la lumière bleue entraînant des troubles de santé. La pollution lumineuse complique également les observations astronomiques en rendant les étoiles et autres objets célestes, difficilement visibles.

Pour quantifier et analyser ce phénomène, deux types de mesures ont été principalement utilisés : les mesures satellitaires et les relevés au sol. Les satellites fournissent une vue d'ensemble de la radiance ascendante, utile pour détecter les tendances à long terme. Cependant, ces données ne capturent pas directement la diffusion lumineuse au sol, où elle affecte le plus les habitats nocturnes.

Les relevés au sol offrent des données spécifiques sur l'illumination au niveau du sol et entre les arbres. Ces mesures sont essentielles pour comprendre l'influence de la lumière artificielle sur les comportements des animaux nocturnes. Les données collectées permettent de comparer les différences en termes de longueur d'onde et d'intensité lumineuse.

Le recours aux Systèmes d'Information Géographique (SIG) a été également un élément clé de ce travail. Ces outils permettent non seulement de cartographier la distribution spatiale de la pollution lumineuse, mais aussi de superposer ces données avec d'autres informations environnementales et sociales pour une analyse plus fine.

Mots clé : Pollution lumineuse ; Biodiversité nocturne ; Systèmes d'Information Géographique (SIG) ; Image satellite.

Abstract

Light pollution in Strasbourg, as in many modern cities, is a growing phenomenon caused by artificial nighttime lighting. This pollution manifests through poorly directed light emissions, over-illumination, and the use of harmful lights, such as those emitting short-wavelength (blue) light. These practices create "light domes" visible in the urban night sky, affecting local ecosystems and altering the behaviors of nocturnal wildlife, such as migratory birds and pollinating insects. Additionally, exposure to blue light can lead to health issues. Light pollution also complicates astronomical observations by making stars and other celestial objects difficult to see.

To quantify and analyze this phenomenon, two main types of measurements have been used: satellite measurements and ground surveys. Satellites provide an overview of upward radiance, useful for detecting long-term trends. However, this data does not directly capture light diffusion at ground level, where it most impacts nocturnal habitats.

Ground surveys offer specific data on illumination at the ground level and between trees. These measurements are essential for understanding the influence of artificial light on the behaviors of nocturnal animals. The data collected allows for comparisons of differences in wavelength and light intensity. The use of Geographic Information Systems (GIS) has also been a key element of this work. These tools allow for the mapping of the spatial distribution of light pollution and the overlay of this data with other environmental and social information for a more detailed analysis.

Keywords : Light Pollution; Nocturnal Biodiversity; Geographic Information Systems (GIS); Satellite Imagery.

Sommaire

Remerciements.....	1
Résumé.....	2
Abstract.....	3
Introduction.....	6
Contexte de Strasbourg.....	6
Contexte du projet.....	9
Stage réalisé.....	11
Principales missions du stage.....	11
Problématique.....	13
Cadre théorique : présentation des enjeux du stage.....	15
Présentation du Laboratoire Image, Ville, Environnement (LIVE).....	15
Encadrement du Stage.....	17
Travaux déjà réalisés.....	18
Etat de l'art.....	19
Pollution lumineuse : définition, caractéristiques, et conséquences de l'éclairage artificiel.....	19
La lumière et ses impacts : mesures, perceptions, et conséquences.....	22
Perturbation des Écosystèmes Nocturnes : Conséquences de la Pollution Lumineuse sur la Biodiversité.....	24
Pollution Lumineuse : Conséquences, Gestion et Préservation des Cieux Sombres.....	32
LED, Sodium et Iodure : Lumière et Conséquences Écologiques.....	36
Cartographie et Modélisation de la Pollution Lumineuse : Enjeux, Méthodes et Applications..	39
Matériel & Méthode :.....	41
Préparation et planification.....	41
Collaboration :.....	42
Relevés de terrain réalisés.....	44
Traitement des données sur Excel.....	48
Traitement de données Qgis.....	50
Interpolation.....	51
Traitement de données.....	55
Résultats.....	57
Analyse Préliminaire des Données et Importance des Traitements SIG.....	57
Analyse de la Superposition des Données Satellitaires et des Relevés au Luxmètre.....	60

Résultats Température de couleur (Kelvin) sur les différents sites	62
De XYZ à RVB : Techniques de Normalisation pour QGIS	67
Discussions	73
Conclusion :	77
Lexique :	88
Table des illustrations :	90
Bibliographie.....	91

Introduction

Contexte de Strasbourg

La pollution lumineuse est un problème environnemental croissant dans les zones urbaines densément peuplées, comme l'Eurométropole de Strasbourg. Cette forme de pollution, due à l'excès de lumière artificielle, nuit à l'observation astronomique, perturbe les écosystèmes nocturnes et peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine. La ville de Strasbourg, qui comprend 33 communes représentant une population d'environ 500 000 habitants, constitue un important territoire urbain dans l'Est de la France. La ville s'est engagée dans diverses initiatives pour réduire cette pollution à travers des réglementations et des actions spécifiques. Depuis le 1er juillet 2013, un arrêté relatif à l'éclairage des bâtiments non résidentiels est en vigueur en France. Cet arrêté stipule que les illuminations des façades des bâtiments doivent être éteintes au plus tard à 1h du matin et rallumées au plus tôt à 7h. Pour les locaux à usage professionnel, l'éclairage doit être coupé au plus tard une heure après la fin de l'occupation des locaux et allumé au plus tôt une heure avant leur réoccupation. À Strasbourg, l'application de cet arrêté varie considérablement. Une étude récente a révélé que la moitié des rues et places concernées ont un taux de vitrines éclairées inférieur à 25%, ce qui montre un potentiel significatif d'amélioration. En revanche, certaines zones comme la rue des Hallebardes, la rue du Dôme, la rue de la Mésange et la place Kléber affichent des taux d'éclairage dépassant 40%, atteignant même plus de 50% sur la place Kléber.

Ces chiffres indiquent que les campagnes de sensibilisation menées jusqu'à présent n'ont pas atteint tous les acteurs concernés, ou que ces acteurs en ont connaissance mais décident d'outrepasser la législation (donc qu'ils font le choix de continuer à éclairer). Il est donc essentiel de poursuivre et d'adapter les démarches de sensibilisation pour améliorer la conformité à la réglementation. La réduction de l'éclairage nocturne permettrait également aux commerçants de réaliser des économies significatives sur leur facture d'électricité,



Figure 1 : Panneaux d'information de coupure d'éclairage public
Auteur : Guillaume Yléann

l'éclairage représentant entre 25% et 50% de leurs coûts énergétiques. Par exemple, le coût énergétique pour un petit commerce peut être réduit de manière substantielle en respectant l'arrêté, contribuant ainsi à une diminution des dépenses opérationnelles.

La ville de Strasbourg a entrepris des actions spécifiques pour lutter contre la pollution lumineuse et améliorer l'efficacité énergétique. Depuis le 25 mars 2023, la municipalité a initié un programme d'extinction progressive des lumières de 1h à 5h du matin dans plusieurs quartiers, avec l'objectif de réduire de 50% l'éclairage public d'ici début 2024, touchant ainsi 14 000 luminaires. Cette opération vise non seulement à diminuer la consommation énergétique de la ville, mais aussi à réduire l'impact de l'éclairage artificiel sur la faune et la flore locale. En 2023, Strasbourg a réussi à réduire sa consommation d'électricité de 13% et sa consommation de gaz de 16%, démontrant l'efficacité de ces mesures de réduction de l'éclairage.

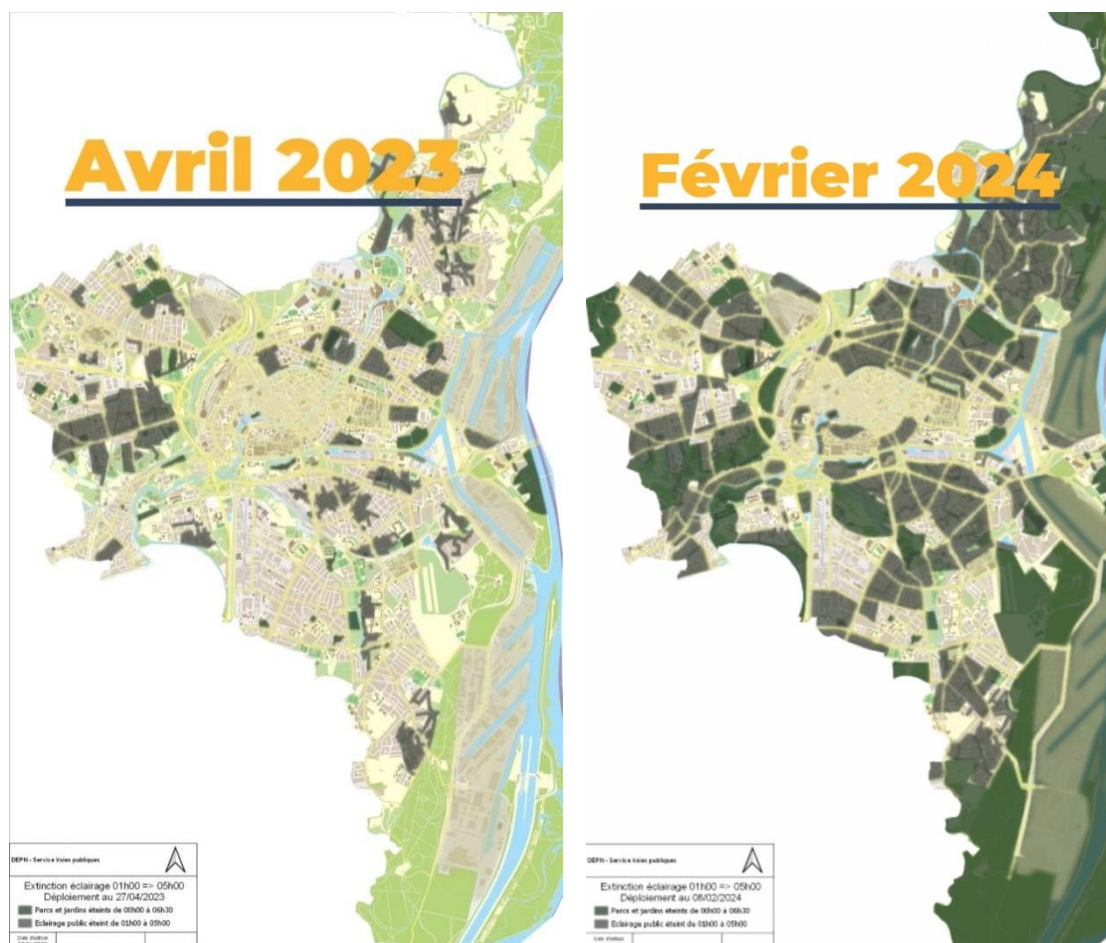


Figure 2 : Comparaison des restrictions lumineuses dans l'Eurométropole de Strasbourg entre Avril 2023 et Février 2024, partie grise soumise à un horaire d'extinction

Source : <https://www.strasbourg.eu/extinction-eclairage-public-strasbourg>

L'initiative de la "Trame Noire" est également un élément central de la stratégie de Strasbourg pour lutter contre la pollution lumineuse. Inspirée de la Trame Verte et Bleue, qui vise à protéger et relier les habitats naturels, la Trame Noire se concentre sur la création de corridors d'obscurité pour la biodiversité nocturne. Cette initiative implique la réduction de l'éclairage dans les zones écologiquement sensibles, permettant ainsi de préserver les écosystèmes nocturnes. Par exemple, dans certains parcs de la ville, l'éclairage est éteint de minuit à 6h30, et les luminaires sont remplacés par des LED de couleur ambrée, moins nocives pour la biodiversité.

Malgré ces efforts, une étude récente a révélé que seuls 5 des 19 bâtiments administratifs et culturels étudiés à Strasbourg respectaient entièrement les critères de l'arrêté, six mois après son entrée en vigueur. La majorité de ces bâtiments continue d'utiliser un éclairage de façade aux heures d'extinction définies par la réglementation, souvent pour mettre en valeur le patrimoine culturel de la ville. Les bâtiments situés sur la place de la République et la place du Château restent éclairés pour des raisons esthétiques et touristiques, bien que des dérogations temporaires soient parfois appliquées, notamment pendant la période de Noël.

Pendant la période de confinement liée à la pandémie de COVID-19, la pertinence de laisser les vitrines commerciales allumées la nuit a été fortement questionnée, surtout dans un contexte où la circulation nocturne était réduite. Cela a conduit à un regain d'intérêt pour la réduction de la pollution lumineuse, d'autant plus avec l'arrivée d'une nouvelle administration municipale écologiste à Strasbourg. Lors du premier confinement, les publications sur les réseaux sociaux se sont multipliées concernant les questions sur l'éclairage des commerces alors que la ville était plongée dans l'ombre en raison des restrictions. En réaction, la municipalité a intensifié ses efforts pour sensibiliser et informer les commerçants sur les avantages économiques et environnementaux de la réduction de l'éclairage nocturne.

La municipalité de Strasbourg a également expérimenté des solutions technologiques innovantes pour gérer l'éclairage public. Par exemple, dans certaines rues et pistes cyclables, l'intensité lumineuse varie en fonction de la présence de piétons ou de cyclistes, permettant ainsi des économies d'énergie sans compromettre la sécurité publique. Ces systèmes utilisent des LED, qui consomment moins d'énergie et sont moins nocives pour l'environnement. En cas d'absence de mouvement, l'intensité lumineuse est diminuée de 70%, ce qui se traduit par une réduction significative de la consommation énergétique tout en maintenant un niveau de sécurité acceptable.

Enfin, la municipalité a adopté une approche collaborative pour sensibiliser les commerçants et les habitants à l'importance de réduire la pollution lumineuse. En appliquant le Règlement local de publicité intercommunal (RLPi) et en dialoguant avec des associations de commerçants et des organisations environnementales, la ville cherche à co-construire des solutions durables. Cette démarche vise à démontrer que les mesures de réduction de l'éclairage peuvent être bénéfiques sur le long terme, tant sur le plan économique qu'environnemental. La ville de Strasbourg promeut une approche pédagogique, cherchant à convaincre les commerçants que la réduction de l'éclairage nocturne n'affectera pas négativement leur attractivité ou leurs ventes, tout en leur permettant de réaliser des économies d'énergie.

Contexte du projet

C'est dans ce cadre que prend forme le projet « Les enjeux de la pollution lumineuse : état des lieux de la Trame Noire à l'Eurométropole de Strasbourg » portée par Anne PUISSANT au Laboratoire LIVE. Ce projet vise à comprendre et à documenter les impacts de la pollution lumineuse sur l'environnement urbain. Il s'inscrit dans le cadre des activités de la Zone Atelier Environnementale Urbaine (ZAEU) de Strasbourg.

La pollution lumineuse, définie comme l'excès de lumière artificielle nocturne, a des conséquences négatives sur l'environnement, la faune, la flore, et la santé humaine. Les principales sources de cette pollution sont l'éclairage public, l'éclairage privé, et les installations industrielles. Les effets de la pollution lumineuse incluent la perturbation des écosystèmes nocturnes, l'impact sur les cycles biologiques des animaux, et les effets sur le sommeil et la santé humaine.

La pollution lumineuse, qui n'est pas un phénomène récent, représente un problème qui a suscité l'inquiétude des astronomes depuis longtemps en raison de la disparition progressive d'un ciel nocturne de qualité, qui permette des observations astronomiques, en raison d'un éclairage artificiel de plus en plus intense. Les conséquences néfastes de la pollution lumineuse pour la faune, la flore et la santé humaine ont été mises en évidence plus récemment. Dans ce contexte global, l'Eurométropole de Strasbourg a entrepris une étude détaillée pour cartographier et analyser l'état de la pollution lumineuse sur son territoire.

Le 25 mars 2020, une image satellite nocturne à très haute résolution spatiale a été acquise par l'Eurométropole de Strasbourg, permettant une analyse fine de l'éclairage artificiel à Strasbourg. Cette image, prise par le satellite chinois Jilin 1-07B (voir annexe 1) le 25 mars 2020 à environ 22 heures, avec une résolution spatiale de 74 cm, couvre une superficie de 600 km², englobant presque entièrement les 33 communes de l'Eurométropole. L'analyse de cette image, couplée à des bases de données sur l'éclairage public, a permis d'établir un état des lieux précis de la pollution lumineuse.

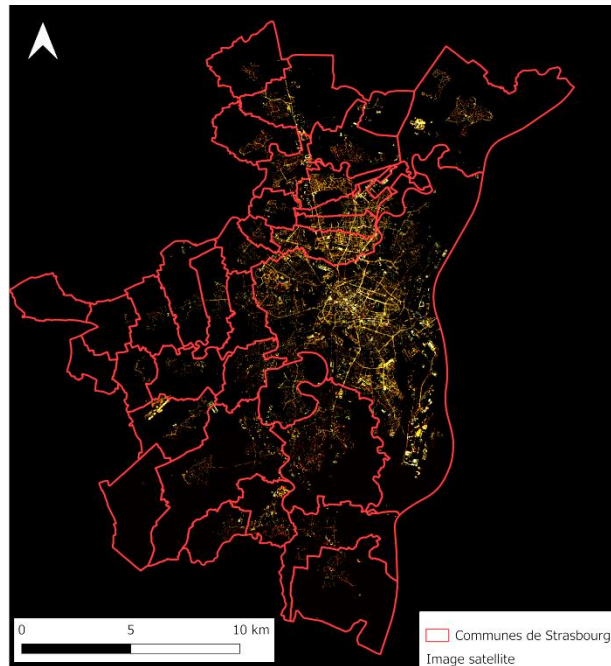


Figure 3 : Image de la pollution lumineuse du satellite Jilin dans l'Eurométropole de Strasbourg

Source : Image Satellite + IGN

Auteur : Guillaume Yléann

Il est essentiel de noter que cette image a été capturée pendant le premier confinement strict dû à l'épidémie de Covid-19, période pendant laquelle le trafic automobile et l'activité commerciale étaient drastiquement réduits et la végétation arborée encore dénuée de feuilles. Ces conditions particulières ont permis une observation plus claire de la lumière émise par différents types d'éclairages, notamment les lampes à sodium, LED et fluorescentes, chacune ayant des signatures spectrales distinctes.

Pour compléter l'analyse satellitaire, des mesures spatialisées au sol à l'aide d'un luxmètre-chromamètre étaient envisagées. Ces mesures devaient permettre de valider et de compléter les données obtenues par satellite, offrant une vision plus complète de la pollution lumineuse. L'utilisation d'outils numériques comme le luxmètre-chromamètre est essentielle pour obtenir des données précises sur l'intensité lumineuse et la température de couleur, permettant ainsi d'affiner les stratégies de réduction de la pollution lumineuse.

Stage réalisé

La pollution lumineuse est devenue un enjeu environnemental majeur pour de nombreuses villes à travers le monde, y compris à Strasbourg. Comme il a été mentionné plus haut, cette forme de pollution a des conséquences néfastes sur la biodiversité, la santé publique et l'astronomie. Pour mesurer et comprendre les différents impacts de la pollution lumineuse, les scientifiques utilisent aujourd'hui des technologies satellitaires et géomatiques. Les satellites permettent d'acquérir des images nocturnes très précises qui montrent la répartition de la lumière artificielle sur le territoire. Ces images sont ensuite analysées par des experts en géomatique à l'aide de différentes techniques pour déterminer les sources de la pollution lumineuse.

Principales missions du stage

Les missions du stage consistaient principalement à effectuer des relevés nocturnes à l'aide d'un luxmètre-chromamètre dans plusieurs quartiers de Strasbourg, en se concentrant sur les zones récemment équipées de lampadaires LED. Les données recueillies devaient ensuite être comparées avec des images satellites de la pollution lumineuse nocturne de 2020 et potentiellement 2024¹. Une telle comparaison visait à évaluer les différences en termes de longueur d'onde et d'intensité lumineuse, en tenant compte des caractéristiques des quartiers, comme la disposition des lampadaires et l'albédo des surfaces.

Le stage avait également pour objectif de produire une analyse des distributions spatiales des intensités lumineuses et des longueurs d'onde, ainsi que mettre en corrélation ces données avec la cartographie récente de l'éclairage public. Une autre tâche importante était d'établir des données sur l'occupation du sol pour qualifier le coefficient de réflexion de la lumière de rue. In fine ce travail pourrait permettre de créer un lien avec un projet parallèle sur l'ambiance sonore, en collaboration avec l'Eurométropole de Strasbourg.

¹ Projet initial ; cependant, du fait d'un changement de politique, le gouvernement français a suspendu l'exploitation des images satellite chinois Jilin

Pour réaliser ce stage, l'utilisation des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) et des techniques de traitement et d'analyse d'images est essentielle. De plus, une bonne compréhension des théories de l'optique et du traitement du signal était nécessaire pour interpréter les résultats.

Il est important de noter que ce stage, initialement prévu par les encadrants pour une durée de six mois, a dû être réalisé en quatre mois du fait de contraintes budgétaires. Par conséquent, les objectifs initiaux de mon stage ont été ajustés en raison de ce temps réduit, pour se concentrer sur les aspects les plus prioritaires du projet ; le nombre de campagnes de récoltes de données a aussi dû être réduit.

Problématique

Contexte: Réaliser des mesures de pollution lumineuse causée par l'éclairage artificiel nocturne est crucial pour comprendre et atténuer ses divers impacts néfastes. Il existe principalement deux types de mesures : celles réalisées par satellite, qui capturent la radiance ascendante à grande échelle ; et celles prises sur le terrain avec des instruments comme les luxmètres, qui évaluent l'éclairage au niveau du sol.

Analyse

Les mesures de la pollution lumineuse à partir des satellites fournissent une vue d'ensemble de la diffusion lumineuse dirigée vers le haut. Ces données sont utiles pour analyser l'impact global de l'éclairage artificiel nocturne sur de grandes zones géographiques et pour détecter les tendances à long terme. Cependant, elles ne capturent pas directement la diffusion lumineuse au niveau du sol, là où elle affecte le plus les habitats des animaux nocturnes.

En revanche, les mesures prises sur le terrain avec des luxmètres et autres instruments photométriques fournissent des données spécifiques sur l'illumination au niveau du sol et entre les arbres. Ces mesures sont cruciales pour comprendre comment la lumière artificielle influence le comportement et les mouvements des animaux nocturnes, qui sont souvent perturbés par l'éclairage direct et les changements de leur environnement lumineux naturel.

Objectifs :

L'objectif est de déterminer si les mesures satellitaires peuvent être suffisantes pour estimer l'impact de la pollution lumineuse sur les animaux nocturnes ou si une combinaison avec des mesures de terrain est nécessaire. En particulier, il s'agit d'évaluer la diffusion lumineuse au niveau du sol dans les habitats naturels et de déterminer quelle méthode offre la meilleure compréhension pour mettre en place des stratégies d'atténuation efficaces.

- Comparer les données satellites avec les mesures de terrain pour déterminer leur complémentarité.
- Proposer une méthodologie standardisée de mesure de la pollution lumineuse qui intègre à la fois les données satellites et les mesures de terrain.

Questions à explorer

1. **Les données satellites peuvent-elles fournir une évaluation précise de la pollution lumineuse sur les habitats naturels?**
 - Dans quelle mesure les images satellites, capturant la lumière ascendante, peuvent-elles estimer l'impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité nocturne au sol?
 - Quelles sont les limitations des satellites, notamment en ce qui concerne la détection des longueurs d'onde courtes (par exemple, la lumière bleue) et l'influence des conditions atmosphériques telles que le brouillard ou les nuages sur la fiabilité des données?

2. **Quelle est la valeur ajoutée des mesures de terrain pour compléter les données satellites dans l'évaluation de la pollution lumineuse?**
 - Les données satellitaires sont-elles suffisantes pour une évaluation exhaustive, ou les mesures de terrain sont-elles indispensables pour capturer l'impact réel sur la faune nocturne?
 - Quels sont les avantages et limites des mesures satellitaires par rapport aux données collectées sur le terrain?

3. **Comment optimiser l'évaluation de la pollution lumineuse à travers la combinaison des données satellitaires et des mesures de terrain?**
 - Quelles méthodes de modélisation et d'intégration des données permettraient de combiner efficacement les observations satellitaires avec les mesures de terrain?
 - Comment développer des protocoles standardisés pour obtenir des mesures précises et comparables?

Problématique

Quelles mesures combinées, et comment, afin d'évaluer le plus précisément possible la diffusion lumineuse et son impact sur la biodiversité nocturnes au niveau du sol ?

Hypothèses :

Les mesures satellitaires d'émission de lumière artificielle réalisées la nuit requièrent des mesures complémentaires de luminosité au niveau du sol pour une caractérisation spatio-temporelle correcte du paysage lumineux nocturne.

Cadre théorique : présentation des enjeux du stage

Le stage dépend de l'Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC) qui gère les fonds de la Zone Atelier de l'Eurométropole de Strasbourg (ZAEU), labellisée par le CNRS. Ce stage, encadré par Eric Maire et Grzegorz Skupinski, s'est déroulé au Laboratoire Image, Ville, Environnement (LIVE) de l'Université de Strasbourg.

Présentation du Laboratoire Image, Ville, Environnement (LIVE)

Le Laboratoire Image, Ville, Environnement (LIVE), situé à Strasbourg, est un centre de recherche interdisciplinaire de l'Université de Strasbourg. Le LIVE concentre les recherches qui y sont menées sur l'étude des interactions entre les images, la ville et l'environnement, avec pour objectif de comprendre et d'analyser les dynamiques urbaines et territoriales. Des approches pluridisciplinaires sont mobilisées, faisant appel aux technologies de l'image et de l'information géographique.

Projet Scientifique

Le projet scientifique du laboratoire LIVE dépasse le cadre urbain pour inclure des aspects environnementaux, d'aménagement et d'urbanisme. Il vise à approfondir la perspective écologique des systèmes socio-environnementaux et à comprendre les mécanismes d'interaction entre l'homme et l'environnement.

Axes de Recherche

Les recherches au LIVE sont organisées autour de cinq axes principaux :

1. Dynamique des Paysages : Étude des paysages et de leur évolution, incluant la géomorphologie fluviale, la pédologie, et la biogéographie.
2. Énergie, Pollution de l'Air et Climat : Évaluation des impacts des activités anthropiques sur l'atmosphère et développement de nouveaux outils pour réduire les besoins énergétiques et la pollution.

3. Dynamique Urbaine, Risques et Mobilité : Analyse des fonctionnements urbains, des mobilités, des risques et vulnérabilités, et de l'accessibilité et morphodynamique urbaine.
4. Image : Utilisation de l'imagerie multi-capteurs pour l'observation et la modélisation des modes d'occupation et d'utilisation des sols.
5. Hydrosystèmes : Étude interdisciplinaire des hydrosystèmes dans une perspective opérationnelle.

L'Axe Image

L'axe "Image" du LIVE dans lequel j'ai réalisé ce stage a pour objectif d'analyser les dynamiques socio-environnementales à court et moyen terme via l'observation multi-capteurs et multi-sources. Les compétences mobilisées concernent le traitement d'images et géomatique, appliquées à l'aménagement du territoire, la gestion des ressources et l'écologie historique. Les thématiques de recherche de cet axe portent sur l'environnement urbain, l'écologie, la modélisation de la biodiversité, et la cartographie volontaire/participative.

Approche Interdisciplinaire

Le laboratoire LIVE adopte une approche systémique utilisant des méthodes quantitatives, la modélisation et la visualisation pour étudier les interactions entre les composantes humaines et environnementales.

Le LIVE assume une responsabilité particulière envers la société, offrant des alertes en cas de danger et des assistances par expertise. Les recherches du laboratoire visent à bénéficier à l'ensemble de la société, incluant les chercheurs, les acteurs socio-économiques, les étudiants et les citoyens.

Collaborations et Formation

Le LIVE collabore avec des partenaires locaux, nationaux et internationaux pour contribuer à la planification urbaine durable et à la gestion de l'environnement. Il est affilié aux instituts nationaux INEE et INSHS du CNRS et au réseau RÉALISE. Le laboratoire participe également aux programmes de master et doctorat de l'Université de Strasbourg et est dirigé par Dominique Badariotti.

Encadrement du Stage

- Eric Maire, ingénieur de recherche au CNRS, est spécialisé dans le traitement de l'information spatiale, la géographie environnementale, la télédétection haute résolution pour l'analyse paysagère et l'application des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) dans divers contextes environnementaux.
- Grzegorz Skupinski, ingénieur d'études au CNRS, travaille au LIVE depuis 2006. Il participe à divers projets de recherche axés sur l'urbanisme, l'environnement et la télédétection.

Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC)

L'Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC), une unité mixte de recherche (UMR 7178) du CNRS et de l'Université de Strasbourg, a été créé le 1er janvier 2006 et est situé sur le campus de Cronenbourg à Strasbourg. Ses activités de recherche sont soutenues par des services et plateformes techniques reconnues nationalement et internationalement.

Zone Atelier Environnementale Urbaine (ZAEU)

La ZAEU est un dispositif de recherche transdisciplinaire et interdisciplinaire sur les socio-écosystèmes régionaux, focalisé sur l'environnement urbain de l'Eurométropole de Strasbourg (EMS). Créée en 2011 et labellisée par l'INEE du CNRS, la ZAEU comprend des laboratoires de recherche et des services de l'EMS, travaillant ensemble pour une compréhension commune et des solutions pour un développement urbain durable. Les thèmes de recherche incluent l'organisation de l'agriculture urbaine, la gestion de la biodiversité urbaine, les effets de l'urbanisation, la gestion des eaux et les transitions écologique, économique, démocratique et sociales.

Ce stage au LIVE, encadré par Eric Maire et Grzegorz Skupinski, se concentre sur la comparaison entre les images satellites de la pollution lumineuse nocturne de l'Eurométropole de Strasbourg (2020) et des mesures au sol effectuées avec un luxmètre-chromamètre. En utilisant une image satellite géoréférencée et des relevés terrain, le projet vise à évaluer l'impact des politiques d'éclairage public sur l'intensité et la longueur d'onde de la lumière

nocturne. Cette étude pourrait permettre d'analyser la corrélation entre les données satellitaires et les conditions réelles, tout en considérant les paramètres urbains comme l'aménagement des lampadaires et l'albédo des surfaces.

Travaux déjà réalisés

Avant ce stage, une première étudiante avait commencé à travailler sur l'exploitation de l'image satellite Jilin.

L'étude s'était concentrée sur deux principaux aspects :

1. **Identification des zones sources de pollution lumineuse** : L'image satellite a été analysée pour identifier les zones émettant une forte pollution lumineuse. La classification des images, technique couramment utilisée en télédétection, a permis de différencier les types d'éclairages en fonction de leur intensité lumineuse. Quatre classes ont été définies, correspondant à divers niveaux d'intensité lumineuse, avec une classe spécifique pour les zones émettant peu ou pas de lumière (classe noire).
2. **Évaluation de l'éclairage privé** : L'étude a estimé que l'éclairage privé représente environ 25% de l'émission lumineuse totale sur le territoire de l'Eurométropole. Cette estimation aide à orienter les interventions pour réduire la pollution lumineuse, en particulier via la planification urbaine et des initiatives comme la Charte "Tous unis pour plus de biodiversités".

Résultats et Analyse

La carte résultant de cette classification montre la répartition de la pollution lumineuse dans les communes de l'Eurométropole et les quartiers de Strasbourg, mettant en évidence un gradient spatial corrélé avec la densité de population : plus la population est dense, plus l'éclairage est intense et moins la classe noire est représentée.

Un aspect crucial de cette étude a été l'exploration de l'impact de la pollution lumineuse sur les zones de haute biodiversité, définies comme des réservoirs de biodiversité dans la Trame Verte et Bleue. La diffusion de la lumière, exacerbée par les interactions avec les molécules et particules atmosphériques, crée des halos lumineux perturbateurs pour la faune nocturne.

Etat de l'art

Pollution lumineuse : définition, caractéristiques, et conséquences de l'éclairage artificiel

La Pollution Lumineuse et sa définition

La pollution lumineuse, un phénomène d'origine anthropique résultant de l'utilisation excessive de l'éclairage artificiel, représente un enjeu significatif dans le contexte de l'Anthropocène (Eklöf, 2023; Goronczy, 2021). Cette forme de pollution altère profondément les environnements nocturnes en modifiant la luminosité naturelle du ciel et en perturbant les cycles biologiques des organismes nocturnes. La définition de la pollution lumineuse est souvent associée à la mesure de la brillance du fond de ciel nocturne, également connue sous le nom de Night Sky Brightness (NSB) (Deverchère & Vauclair, 2019). Cette brillance est exprimée en magnitudes par seconde d'arc au carré ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$), une unité de mesure de la luminance (Angerand, 2020-2021).

Le terme "pollution lumineuse" a été introduit dans les années 1990 pour décrire l'impact de la lumière artificielle sur l'environnement (Vauclair & Kimenau, 2020). Cette définition a évolué pour inclure non seulement la perturbation du cycle jour/nuit, mais aussi les effets directs sur les organismes vivants et les écosystèmes (Longcore & Rich, 2004). Ainsi, la pollution lumineuse se définit comme une lumière artificielle qui perturbe les rythmes naturels et altère les interactions écologiques.

Malgré le fait que l'éclairage artificiel ne représente qu'une petite fraction de la consommation d'énergie globale, une grande partie de cette lumière est gaspillée, se dissipant dans le ciel au lieu d'éclairer efficacement les zones ciblées (Eklöf, 2023). Cette dispersion nuit non seulement à l'observation des étoiles et à la qualité du ciel nocturne, mais a également des conséquences écologiques, perturbant les cycles naturels des espèces nocturnes et modifiant les habitats naturels.

La pollution lumineuse est un terme encore inconnu pour beaucoup, mais il s'agit d'un domaine de recherche en pleine expansion, et la lumière sera probablement bientôt réglementée de manière aussi stricte que le bruit (Eklöf, 2023).

Caractéristiques de la Lumière Artificielle et Mesures de la Pollution Lumineuse

La pollution lumineuse se définit comme la lumière artificielle qui perturbe le cycle naturel jour/nuit et affecte les organismes vivants et leurs écosystèmes (Longcore & Rich, 2004). Elle englobe non seulement le spectre visible de 380-780 nm (longueurs d'ondes lumineuses visibles par les humains) mais aussi les infrarouges (IR) et les ultraviolets (UV), lesquels sont perceptibles par divers organismes et ont des impacts environnementaux significatifs (Goronczy, 2021).

La lumière artificielle émise par les sources d'éclairage présente des caractéristiques spécifiques influençant son impact sur l'environnement. L'intensité lumineuse et la surface émettrice de la source sont des facteurs déterminants dans la perception de l'éblouissement par les êtres vivants. Une intensité lumineuse élevée combinée à une petite surface d'émission entraîne une forte luminance perçue par l'œil, augmentant ainsi les risques d'éblouissement (Sordello et al., 2018).

La quantification de la lumière émise par les sources lumineuses est essentielle pour évaluer la pollution lumineuse et ses effets sur l'environnement. La puissance, exprimée en watts ou en lumens, représente la quantité totale de lumière émise. L'intensité lumineuse, mesurée en candela, quantifie la lumière émise dans une direction spécifique, tandis que l'éclairement, exprimé en lux, mesure le flux lumineux perçu par l'œil humain sur une surface éclairée d'un mètre carré (Sordello et al., 2018). Ces mesures permettent de comprendre comment la lumière se propage et comment elle peut être optimisée pour réduire la pollution lumineuse tout en assurant une illumination adéquate.

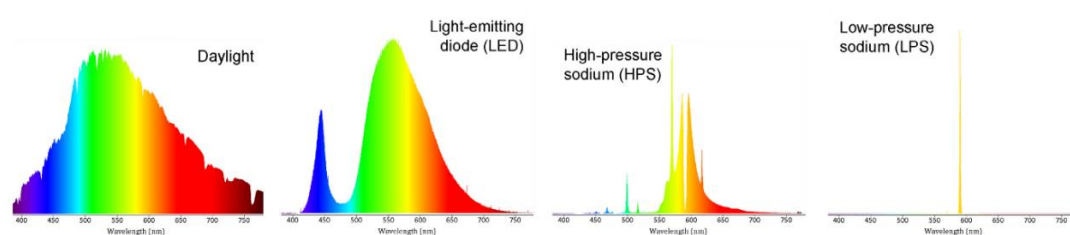


Figure 4 : signatures spectrales de différentes sources lumineuses.

Auteurs : BOYES et al., 2020

Historique et Conséquences de l'Éclairage Artificiel

L'éclairage artificiel a une longue histoire, remontant à l'utilisation du feu, suivi par les lampes à huile, les bougies, les lampes à gaz, et enfin les lampes électriques au XIXe siècle. L'urbanisation au XXe siècle a vu une expansion massive de l'éclairage public, avec l'accessibilité accrue à l'électricité et l'augmentation des déplacements automobiles. Cet essor a conduit à une utilisation excessive de l'éclairage artificiel, posant des problèmes écologiques et sanitaires significatifs (Challéat, 2019).

L'éclairage, qu'il soit public ou privé, joue un rôle essentiel dans la société moderne en fournissant sécurité et confort. Cependant, son utilisation excessive et inefficace entraîne des conséquences économiques et environnementales néfastes (Narisada & Schreuder, 2004). Par exemple, une grande partie de la lumière émise par l'éclairage public et privé est gaspillée, se dissipant dans le ciel au lieu d'éclairer efficacement les zones ciblées (Eklöf, 2023). Cette dispersion nuit non seulement à l'observation des étoiles et à la qualité du ciel nocturne, mais aussi à l'efficacité énergétique, augmentant ainsi les coûts et la consommation d'énergie.

Comprendre et Mesurer la Lumière Artificielle

La lumière artificielle présente diverses caractéristiques mesurables essentielles pour comprendre et gérer la pollution lumineuse. Voici quelques-unes de ces mesures :

1. **Flux Lumineux (Lumens)** : Mesure la quantité totale de lumière émise par une source. C'est une indication de la puissance lumineuse globale de la source.
2. **Intensité Lumineuse (Candela)** : Quantifie la lumière émise dans une direction spécifique. C'est crucial pour comprendre comment la lumière est distribuée et perçue.
3. **Luminance (Candelas par mètre carré)** : Représente l'intensité lumineuse rapportée à la surface d'émission. C'est une mesure clé pour évaluer l'éblouissement.
4. **Éclairement (Lux)** : Mesure le flux lumineux perçu par l'œil humain sur une surface d'un mètre carré. Cela aide à évaluer l'illumination réelle d'un espace et son adéquation pour différentes activités.

Ces mesures permettent de définir précisément les caractéristiques de l'éclairage et de développer des stratégies pour minimiser la pollution lumineuse. Par exemple, en optimisant l'intensité et la distribution de la lumière, il est possible de réduire le gaspillage et les impacts négatifs sur l'environnement tout en maintenant un éclairage suffisant pour la sécurité et le confort.

La lumière et ses impacts : mesures, perceptions, et conséquences

La Lumière et ses Mesures

La lumière, une forme d'énergie électromagnétique, se manifeste à la fois comme une onde et une particule. Les observations de scientifiques tels que Christiaan Huygens et Isaac Newton ont jeté les bases de notre compréhension de la dualité onde-particule de la lumière. Cette dualité a été confirmée par les travaux d'Albert Einstein, qui a proposé que la lumière soit constituée de particules appelées photons, tout en conservant ses propriétés ondulatoires. La lumière visible fait partie du spectre électromagnétique, lequel regroupe l'ensemble des radiations électromagnétiques, des ondes radio aux rayons gamma. Les humains perçoivent les longueurs d'ondes lumineuses situées entre environ 380 et 800 nanomètres, avec des variations de couleur correspondant à différentes longueurs d'onde. Cette perception varie selon les espèces, certaines étant sensibles à des longueurs d'onde infrarouges ou ultraviolettes.

Impact de la Lumière sur les Organismes

La diffusion atmosphérique, un phénomène lié à la propagation de la lumière dans l'atmosphère, est influencée par la longueur d'onde du rayonnement et les conditions atmosphériques. Les longueurs d'ondes courtes, telles que le bleu, sont davantage diffusées que les longueurs d'onde longues, créant ainsi le phénomène du ciel bleu. Cette diffusion affecte la perception de la lumière par les organismes et peut avoir des implications sur leur comportement et leur physiologie.

Éblouissement et Éclairage

La luminance, mesurée en candelas par mètre carré (cd/m^2), représente l'intensité lumineuse rapportée à la surface d'émission de la lumière. Plus la quantité de lumière émise est grande et la surface d'émission petite, plus la luminance perçue par l'œil humain est élevée, entraînant un éblouissement plus fort. Ce phénomène est crucial non seulement pour l'expérience humaine, mais également pour la faune. Avec l'augmentation de l'utilisation des LED, qui ont une luminance plus élevée que les lampes traditionnelles à décharge ou à vapeur de sodium en raison de leur petite surface d'émission, les risques d'éblouissement pour les espèces animales deviennent préoccupants.

Éclairage et Température de Couleur

L'éclairage, exprimé en lux (lumens par mètre carré), est une mesure de la quantité de lumière reçue par une surface. Cette mesure est cruciale pour diverses applications, allant de l'éclairage des espaces publics à la détermination des conditions de croissance des plantes en horticulture. L'éclairage permet de quantifier la lumière projetée sur des surfaces d'intérêt, comme le sol, les routes, ou encore les objets éclairés dans une pièce, assurant ainsi une illumination adéquate pour les activités humaines et les besoins écologiques (Sordello et al., 2018).

Chaque source lumineuse émet une lumière caractérisée par des proportions spécifiques de longueurs d'onde, formant ce qu'on appelle un spectre lumineux. Ce spectre peut être représenté sous forme de diagrammes montrant l'intensité de chaque longueur d'onde. Par exemple, une lampe à incandescence émet une large gamme de longueurs d'onde, avec une intensité plus élevée dans le spectre rouge, tandis qu'une lampe fluorescente émet des pics d'intensité à des longueurs d'onde spécifiques, créant une lumière perçue comme blanche par l'œil humain.

La température de couleur, mesurée en Kelvin (K), décrit la teinte de la lumière émise par une source lumineuse. Plus la lumière contient de bleu, plus sa température est élevée (lumière froide) (voir figure 6 ; 7 et p30 « Effets sur la santé humaine »), et plus elle contient de rouge, plus sa température est basse (lumière chaude).

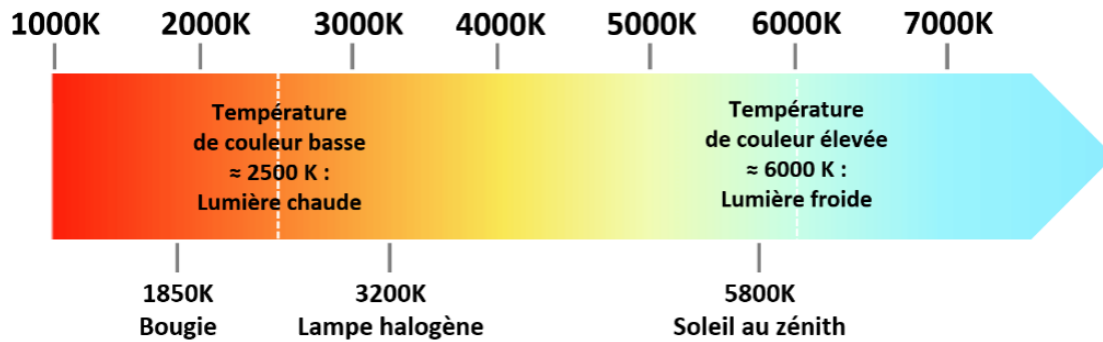


Figure 5 : Représentation Visuelle de la Température de Couleur en Kelvin et des Types de Lumière Correspondants

Source : Basé sur ASCEN, 2019; MEB - ANPCEN, 2015; Verny & Busson, 2018

Auteur : Charlotte Angerand

Perturbation des Écosystèmes Nocturnes : Conséquences de la Pollution Lumineuse sur la Biodiversité

Impacts de la Pollution Lumineuse sur la Biodiversité

La pollution lumineuse a des impacts profonds sur la biodiversité, affectant environ 30 % des vertébrés et 65 % des invertébrés qui sont nocturnes (Holker et al., 2010). Cette altération du cycle naturel jour/nuit par une lumière artificielle excessive perturbe les rythmes naturels des écosystèmes, affectant de manière significative la faune et la flore nocturnes (Narisada & Schreuder, 2004). Les conséquences écologiques de la pollution lumineuse sont multiples, allant de la fragmentation des habitats à la perturbation des cycles de reproduction des espèces (Laforge et al., 2019).

Les systèmes de vision des espèces photosensibles peuvent être saturés par la lumière artificielle, causant éblouissement et désorientation (Rich & Longcore, 2006). Certaines espèces présentent un phototactisme positif sont attirées par les sources lumineuses artificielles, qui deviennent ainsi des pièges écologiques entraînant la mort par épuisement, surchauffe ou prédation (Thums et al., 2016; Le Corre et al., 2002). En outre, la lumière artificielle perturbe les cycles de reproduction, de migration et de comportement des animaux, ainsi que la germination et la croissance des plantes (Longcore & Rich, 2004). Ces perturbations peuvent modifier les interactions entre les espèces, entraînant des déséquilibres dans les écosystèmes (Vauclair & Kimenau, 2020).

La sensibilité à la lumière varie considérablement d'une espèce à l'autre. Certains organismes sont capables de percevoir des longueurs d'onde que les humains ne peuvent pas détecter, telles que les infrarouges et les ultraviolets. Ces capacités de perception peuvent avoir des effets sur le comportement et la physiologie des espèces (Goronczy, 2021). L'introduction de lumière dans des environnements naturels peut favoriser certaines espèces au détriment d'autres, entraînant ainsi des déséquilibres écologiques (Goronczy, 2021).

Impact sur la flore

La pollution lumineuse affecte la physiologie, la croissance, la reproduction et le rythme saisonniers des plantes, qui dépendent de la lumière pour la photosynthèse. Elles voient leur comportement et leur développement modifiés par l'exposition à des sources lumineuses artificielles (Narisada & Schreuder, 2004).

D'une part, la lumière influence les activités physiologiques des plantes, telles que l'assimilation, ainsi que leur morphologie et leur développement. Elle joue un rôle crucial dans des processus clés comme la floraison et la reproduction. Le rythme saisonnier des plantes est également affecté par la durée du jour et de la nuit. La manipulation de cette durée, notamment dans les serres, peut être utilisée pour contrôler la floraison et la croissance des plantes à des fins de production agricole.

D'autre part, les types et les propriétés spécifiques des sources lumineuses ont des effets distincts sur les plantes. Les lampes modernes telles que les LED, avec leur spectre de lumière blanche similaire à celui du soleil matinal, peuvent influencer différemment la croissance et la floraison des plantes par rapport aux lampes plus anciennes, jaunes ou ambrées (Eklöf, 2023). Certains types de lumière, comme le blanc intense des LED, peuvent inhiber plutôt que stimuler la floraison de certaines plantes.

La réaction des plantes à la lumière artificielle dépend donc du contexte environnemental et des propriétés de la lumière elle-même. Les variations dans l'intensité, la couleur et la durée de l'exposition lumineuse peuvent avoir des conséquences importantes sur le développement et le cycle de vie des plantes, ce qui souligne l'importance de prendre en compte la pollution lumineuse dans la gestion des écosystèmes et des activités agricoles pour préserver la santé et la productivité des plantes (Narisada & Schreuder, 2004; Eklöf, 2023). Ces changements peuvent altérer la compétition entre espèces végétales, modifiant les écosystèmes et perturbant les relations symbiotiques.

Certains champignons présentent une bioluminescence, une caractéristique partagée avec les vers luisants (Eklöf, 2023). Cette lumière émise par les champignons leur permet d'attirer des insectes tels que les mouches, les coléoptères et les fourmis, qui jouent un rôle essentiel dans la dispersion des spores du champignon.

Impacte sur la faune

La pollution lumineuse a un impact significatif sur la vie nocturne des différentes espèces, aussi bien pour les plantes que les espèces animales (Mizon, 2012; Sordello et al., 2018; Dewdney, 2004; Eklöf, 2023). Cette perturbation des cycles naturels de lumière et d'obscurité affecte profondément les comportements et les interactions écologiques.

Les animaux nocturnes, tels que les chauves-souris, ont développé des adaptations spéciales pour naviguer et chasser dans l'obscurité totale (Dewdney, 2004; Mizon, 2012). Les chauves-souris utilisent l'écholocation ultrasonique pour localiser leurs proies dans le noir, utilisant des sons à haute fréquence pour se déplacer efficacement à travers un environnement dense. Cependant, la pollution lumineuse provenant de l'éclairage artificiel perturbe ce processus en masquant les signaux naturels et en créant des interférences, ce qui réduit les opportunités de chasse et affecte négativement leur survie (Mizon, 2012).

De même, les mammifères qui comptent sur l'obscurité pour se déplacer en toute sécurité sont confrontés à des défis croissants dus à la pollution lumineuse (Eklöf, 2023). Les premiers mammifères se sont adaptés à la vie nocturne pour éviter les prédateurs et se nourrir d'insectes nocturnes, exploitant les ressources disponibles pendant la nuit (Eklöf, 2023). Cependant, avec l'introduction généralisée de l'éclairage artificiel, ces animaux se retrouvent désorientés et attirés vers les sources lumineuses artificielles, ce qui peut entraîner leur mort par épuisement, surchauffe ou prédation (Sordello et al., 2018).

La présence de points lumineux artificiels agit comme un piège écologique pour de nombreuses espèces, les attirant loin de leur trajectoire naturelle (Sordello et al., 2018). Les animaux naviguent traditionnellement en utilisant les structures lumineuses naturelles telles que les étoiles et la Lune, mais la pollution lumineuse altère ces repères et les conduit vers des zones potentiellement dangereuses (Sordello et al., 2018).

Un problème pour les oiseaux

La pollution lumineuse pose un problème majeur pour les oiseaux, en perturbant leurs comportements naturels et en entraînant des conséquences souvent fatales. Contrairement aux humains, les animaux, y compris les oiseaux, ne peuvent pas échapper facilement à l'impact de la lumière artificielle, et ils peuvent même être attirés par celle-ci (Goronczy, 2021). Cette attraction peut conduire à des collisions catastrophiques avec des structures illuminées, telles que les antennes de télévision et les bâtiments éclairés, entraînant la mort de nombreux oiseaux migrateurs chaque nuit (Mizon, 2012).

Les migrations nocturnes des oiseaux, qui représentent jusqu'à 60 % des espèces migratrices, sont particulièrement affectées par la lumière artificielle (Bogard, 2008). La présence de lumières vives et clignotantes peut induire les oiseaux en erreur, les faisant confondre les sources lumineuses avec les étoiles qu'ils utilisent traditionnellement pour leur orientation (Bogard, 2008). Cette confusion perturbe leurs voies migratoires et peut les amener à s'écraser contre des obstacles tels que des tours ou des phares, entraînant des collisions massives et des décès en masse (Eklöf, 2023).

De plus, la lumière artificielle peut affecter la synchronisation des cycles de reproduction chez les oiseaux en masquant les signaux naturels du jour et de la nuit (Eklöf, 2023). Cette désynchronisation peut avoir des conséquences graves, telles que l'éclosion précoce des œufs avant que la nourriture ne soit disponible, entraînant un stress physiologique et une diminution des taux de survie (Robertson, 2023).

Les oiseaux, avec leur vision plus complexe et sensible aux longueurs d'onde, sont particulièrement vulnérables à l'éclairage artificiel qui perturbe leur capacité à naviguer et à percevoir leur environnement nocturne de manière naturelle (Eklöf, 2023). Les collisions avec des fenêtres transparentes, qui semblent refléter le ciel nocturne, sont un autre exemple tragique de la manière dont la pollution lumineuse peut avoir un impact dévastateur sur les populations aviaires (Robertson, 2023).

Les conséquences pour les insectes nocturnes

La relation entre la pollution lumineuse et les insectes nocturnes représente un enjeu majeur pour la biodiversité, impactant leur comportement, leur reproduction et leur survie dans les écosystèmes nocturnes (Dewdney, 2004 ; Eklöf, 2023). Les insectes, qui dépendent souvent de la lumière naturelle pour leur navigation et leurs activités nocturnes, sont sensibles aux éclairages artificiels qui perturbent leurs repères visuels (Narisada et Schreuder, 2004). Par exemple, les lampadaires émettant dans le spectre du vert, du bleu et de l'ultraviolet attirent fortement les insectes nocturnes, les désorientant et les entraînant vers des zones inadaptées à leur survie (Eklöf, 2023).

La lumière artificielle, particulièrement présente le long des routes et dans les zones urbaines, agit comme un piège pour les insectes en perturbant leurs habitudes naturelles de déplacement et de recherche de nourriture (Dewdney, 2004). Ces perturbations peuvent entraîner une diminution des populations d'insectes nocturnes, ce qui a des répercussions sur la pollinisation des plantes et sur les chaînes alimentaires locales (Eklöf, 2023).

L'attraction des insectes par la lumière artificielle peut également affecter leur cycle de reproduction, leur capacité à trouver des partenaires et à se nourrir, ainsi que leur capacité à éviter les prédateurs (Narisada et Schreuder, 2004). En s'orientant vers les sources lumineuses artificielles, les insectes peuvent être victimes d'épuisement, de surchauffe ou de prédation accrue, ce qui réduit leur survie et leur contribution essentielle aux écosystèmes (Dewdney, 2004).

Ainsi, la pollution lumineuse provenant des lampadaires et des éclairages urbains peut avoir des effets dévastateurs sur les populations d'insectes nocturnes et sur les écosystèmes dans leur ensemble. Comprendre cette relation complexe entre lumière artificielle et biodiversité nocturne est essentiel pour prendre des mesures efficaces de préservation et de gestion environnementale (Eklöf 2023 ; Narisada et Schreuder, 2004).

Impact sur les écosystèmes marins

Moins visible au vu de l'homme, la pollution lumineuse affecte les écosystèmes marins, perturbant les cycles naturels et les comportements des espèces. Les bébés tortues marines, par exemple, sont particulièrement vulnérables aux effets de la lumière artificielle lors de leur

naissance sur les plages. Ces nouveau-nés ont évolué pour s'orienter vers les signaux lumineux naturels de la Lune et des étoiles réfléchis par l'océan, qui guide leur trajectoire vers l'eau où ils trouvent refuge (Goronczy, 2021). La présence de sources lumineuses artificielles telles que les lampadaires des zones urbaines ou les installations côtières peut désorienter ces jeunes tortues, les attirant à l'intérieur des terres vers des environnements dangereux comme les routes, entraînant un taux de mortalité significatif (Goronczy, 2021; Mizon, 2012).

De plus, la pollution lumineuse affecte également d'autres créatures marines, notamment les poissons et les organismes des récifs coralliens. Les installations côtières, les plates-formes pétrolières et les navires de pêche diffusent des lumières artificielles qui perturbent les rythmes naturels et les comportements de ces espèces (Mizon, 2012). Les lumières nocturnes peuvent perturber les rituels d'accouplement des coraux dans les récifs, compromettant ainsi la reproduction et la santé des écosystèmes coralliens (Eklöf, 2023).

Des initiatives telles que l'installation de barrières lumineuses ou l'adoption de réglementations sur l'éclairage nocturne peuvent aider à réduire l'impact sur les espèces marines vulnérables (Goronczy, 2021).

Tableau 6 : Lampes pouvant être recommandées lorsque la présence d'un éclairage artificiel demeure nécessaire

Longueurs d'ondes (nm)	UV							IR		
	<400	400 - 420	420 - 500	500 - 575	575 - 585	585 - 605	605 - 700	>700	Lampes les « moins néfastes »	Lampes néfastes mais aux impacts plus « modérés »
Poissons d'eau douce	x	x	x	x	x	x	x		- Sodium Basse Pression - LEDs Ambrées à spectre étroit	- Sodium Haute Pression
Poissons marins	x	x	x	x					- Sodium Basse Pression - Sodium Haute Pression	- Fluo compacte (Blanc le plus chaud < 2700°K) - Tube Fluorescent (Blanc le plus chaud < 2700°K)
Crustacés (zooplancton)	x	x*	x*						- LEDs Ambrées à spectre étroit -LEDs Rouges	- Tube Fluorescent (Blanc le plus chaud < 2700°K)
Amphibiens et reptiles	x	x	x	< à 500 et > à 550	x	x	x	x		- Sodium Basse Pression
Oiseaux	x	x	x	x		x	x	x	- Sodium Basse Pression - LEDs Ambrées à spectre étroit	- Sodium Haute Pression - Tube Fluorescent (Blanc le plus chaud < 2700°K)
Mammifères (hors chiroptères)	x	x	x	x				x	- Sodium Basse Pression - LEDs Ambrées à spectre étroit	- Sodium Haute Pression - Fluo compacte (Blanc le plus chaud < 2700°K) - Tube Fluorescent (Blanc le plus chaud < 2700°K)
Chiroptères	x	x	x	x					- Sodium Basse Pression - Sodium Haute Pression	- Fluo compacte (Blanc le plus chaud < 2700°K)
Insectes	x	x	x	x					- LEDs Ambrées à spectre étroit -LEDs Rouges	- Tube Fluorescent (Blanc le plus chaud < 2700°K)

x* : Probable mais non identifié dans la littérature scientifique

© MEB-ANPCEN 2015

Figure 6 : Tableau regroupant l'impact de différentes bandes spectrales de la lumière sur différents groupes d'espèces.

Source : [demande_de_derogation_aout2022_vf_base_vaires-121-180.pdf](#) (developpement-durable.gouv.fr)

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

Légende :

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

Figure 7 : Risques d'impacts sur la biodiversité en fonction des longueurs d'ondes perçus.

Auteur : SORDELLO R., 2017

Effets sur la santé humaine

La lumière artificielle, en particulier la lumière bleue émise par les écrans et certaines sources d'éclairage, peut perturber les rythmes circadiens des humains. Ces rythmes, qui régulent le cycle veille-sommeil, sont cruciaux pour le bien-être physique et mental. L'exposition à la lumière bleue pendant la nuit peut inhiber la production de mélatonine, une hormone essentielle à l'endormissement, entraînant des troubles du sommeil et des problèmes de santé associés tels que l'insomnie, la dépression et les maladies cardiovasculaires (Chepesiuk, 2009).

La pollution lumineuse peut également avoir des effets psychologiques et physiologiques significatifs. La réduction de la qualité du sommeil due à l'exposition à la lumière artificielle peut entraîner de la fatigue, des troubles de l'humeur et une diminution des performances cognitives. De plus, l'éclairage nocturne peut augmenter le risque de certains cancers, notamment le cancer du sein et de la prostate, en raison de la perturbation des niveaux hormonaux (Chepesiuk, 2009). Mais également, la pollution lumineuse est associée à une augmentation du risque de certaines maladies chroniques, telles que l'obésité, le diabète et les maladies cardiovasculaires (Stimac, 2019).

En résumé, la pollution lumineuse perturbe les rythmes naturels des écosystèmes nocturnes et a des conséquences écologiques graves, allant de la fragmentation des habitats à la perturbation des cycles biologiques des espèces. Ces perturbations peuvent également modifier les interactions interspécifiques, créant des déséquilibres dans les écosystèmes. La diversité de perception de la lumière par les différents organismes rend complexe l'évaluation de l'impact de la lumière artificielle, soulignant la nécessité d'une approche plus nuancée et spécifique pour chaque espèce et environnement affecté.

Vision nocturne et lumière

La vision nocturne des animaux est une adaptation remarquable aux conditions de faible luminosité pour assurer leur survie. Contrairement à la vision diurne qui repose sur une abondance de lumière, la vision nocturne implique des mécanismes optiques spéciaux pour capter et amplifier les faibles lueurs disponibles (Dewdney, 2004). De ce fait, la pollution lumineuse a un impact crucial sur la fonction visuelle des êtres vivants, notamment sur la manière dont les yeux humains et animaux interagissent avec leur environnement nocturne (Eklöf, 2023; Sordello et al., 2018).

Chez les humains, l'œil est un organe complexe qui réagit à la lumière pour former des images et transmettre des informations au cerveau. La lumière pénètre d'abord à travers la cornée et l'iris, qui contrôle la taille de la pupille en fonction de l'intensité lumineuse (Eklöf, 2023). En conditions de faible luminosité, la pupille se dilate pour permettre une meilleure captation de la lumière, tandis qu'elle se contracte en plein jour pour protéger la rétine d'une surcharge de photons. À l'arrière de l'œil, la lumière est captée par la rétine où se trouvent des photorécepteurs appelés cônes et bâtonnets. Les cônes sont sensibles aux couleurs et fournissent une vision détaillée en plein jour, mais deviennent moins efficaces dans l'obscurité (Eklöf, 2023). En conditions de faible luminosité, les bâtonnets deviennent prédominants, permettant une vision nocturne, mais en niveaux de gris.

Les animaux, quant à eux, ont développé des adaptations spécifiques pour une vision nocturne efficace. Les animaux nocturnes possèdent généralement de grands yeux dotés de pupilles dilatées, ce qui permet d'augmenter la quantité de lumière atteignant la rétine. Par exemple, les hiboux, les chats, les lémurins et les tarsiers ont des yeux relativement plus grands par rapport à leur taille corporelle, favorisant ainsi la captation de la lumière ambiante (Dewdney, 2004).

Un autre trait important est la présence du tapetum lucidum, une couche réfléchissante située derrière la rétine. Cette structure réfléchit la lumière qui a déjà traversé la rétine, augmentant ainsi l'efficacité de la vision dans des conditions de faible luminosité. Cette caractéristique est également responsable du phénomène de « lueur nocturne », qui rend les yeux de certains animaux luminescents dans l'obscurité (Sordello et al., 2018 ; Dewdney, 2004).

Les pupilles des animaux nocturnes sont souvent verticales, ce qui leur permet de se fermer plus rapidement et efficacement que les pupilles rondes. Cette adaptation protège les yeux sensibles à la lumière pendant la journée tout en maximisant la quantité de lumière captée la nuit (Dewdney, 2004). En revanche, certains oiseaux nocturnes comme les chouettes ont des pupilles rondes qui peuvent s'adapter en taille pour réguler la quantité de lumière entrant, tout en conservant une bonne vision nocturne. Chez ces oiseaux, la pupille peut s'étendre pour couvrir presque toute la surface de l'œil dans l'obscurité totale, permettant une vision optimale dans des conditions de faible luminosité (Dewdney, 2004).

La pollution lumineuse perturbe donc ces processus naturels. La lumière artificielle directe peut entraîner un éblouissement pour les animaux nocturnes, perturbant leur vision et leur capacité à se repérer dans l'obscurité (Sordello et al., 2018).

Pollution Lumineuse : Conséquences, Gestion et Préservation des Cieux Sombres

Effets sur les Écosystèmes

L'éclairage mal orienté et excessif contribue à des niveaux de pollution équivalents aux émissions de CO₂ de millions de voitures (Deverchère, Vauclair & Bonavita, 2017). La lumière artificielle affecte les écosystèmes en perturbant les cycles de vie des espèces nocturnes. Les rythmes naturels des espèces sont altérés, entraînant des modifications comportementales et physiologiques importantes (Eklöf, 2023). La pollution lumineuse a des implications à long terme sur les écosystèmes et la santé humaine, et la gestion de l'éclairage devient cruciale pour atténuer ces effets.

Importance de la Conception de l'Éclairage

La lumière artificielle est perçue culturellement comme synonyme de sécurité et de confort, mais une mauvaise conception de l'éclairage peut entraîner des pertes économiques et environnementales considérables (Narisada & Schreuder, 2004). Une bonne conception de l'éclairage devrait garantir que la lumière arrive là où elle est nécessaire et ne tombe pas ailleurs, minimisant ainsi les effets délétères de la pollution lumineuse. Des technologies d'éclairage plus respectueuses de l'environnement, comme les LED ambrées, sont de plus en plus adoptées. Les lampes à iodure métallique et les lampes à sodium haute pression offrent des options variées selon les besoins en éclairage et leurs impacts sur l'environnement.

En parallèle à la conception d'un éclairage efficace, une autre préoccupation majeure est la préservation des cieux, essentielle pour diverses activités, dont l'observation astronomique."

Protéger les Cieux Sombres

Stimac (2019) souligne l'importance de protéger les cieux sombres pour des activités telles que l'astrotourisme. Les endroits où le ciel nocturne reste préservé offrent des opportunités uniques pour l'observation astronomique et attirent de nombreux visiteurs. Protéger ces zones est crucial pour la biodiversité, mais aussi pour permettre aux humains de se reconnecter avec la nature et le cosmos. En France, environ 12 000 communes ont réduit leur éclairage public pour économiser de l'énergie et réduire l'impact environnemental (ANPCEN, 2022).

Si la protection des cieux sombres est primordiale, elle ne peut se faire efficacement sans une régulation adéquate. Les réglementations et innovations technologiques jouent donc un rôle clé dans la lutte contre la pollution lumineuse.

Réglementations et Innovations Technologiques

Actuellement, la plupart des pays n'ont pas de législation stricte pour contrôler la pollution lumineuse. La mise en place de bonnes pratiques de conception de l'éclairage, visant à minimiser la lumière intrusive, pourrait entraîner des gains économiques et environnementaux considérables (Narisada & Schreuder, 2004). Les gouvernements locaux peuvent encourager l'adoption de technologies d'éclairage plus durables et respectueuses de l'environnement. L'utilisation de technologies de contrôle de l'éclairage, telles que les capteurs de mouvement et les minuteries, sont essentiels pour s'assurer que la lumière n'est utilisée que lorsque nécessaire (Deverchère, Vauclair & Nguyen Duy-Bardakji, 2018).

La pollution lumineuse engendre également des pertes économiques indirectes, telles que les accidents de la route causés par un éclairage excessif et inapproprié (Stimac, 2019). Une gestion efficace de l'éclairage permet de réduire ces coûts et d'optimiser les ressources financières des municipalités (Deverchère et al., 2018). La production d'électricité à partir de combustibles fossiles alimente en partie cette surconsommation, aggravant le problème du changement climatique (Narisada & Schreuder, 2004). Par conséquent, la réduction de la pollution lumineuse est bénéfique pour la biodiversité et la préservation de l'environnement.

À mesure que la population urbaine augmente, la gestion de l'éclairage devient cruciale pour atténuer ces effets. Les recherches montrent que les niveaux de pollution lumineuse continuent d'augmenter de 2 % par an à l'échelle mondiale, soulignant la nécessité de mesures de gestion plus strictes et de solutions innovantes pour protéger les écosystèmes nocturnes.

La Trame Noire : Définition et Importance

La Trame Noire, parfois appelée « Trame Sombre » ou « Trame Étoilée », est un concept émergent en Europe visant à réduire la pollution lumineuse et à préserver les milieux naturels peu touchés par cette forme de pollution. Selon Hendrickx (2017), une Trame Noire correspond à un réseau de zones peu impactées par la lumière artificielle. Cette continuité écologique, similaire à la Trame Verte et Bleue (TVB), aide à maintenir des conditions structurelles et fonctionnelles adéquates pour la biodiversité.

La Trame Noire se compose de zones centrales et de corridors d'obscurité relative, nécessaires pour soutenir le réseau écologique en place en prenant en compte les besoins en obscurité des cycles de vie de la biodiversité. L'objectif principal de la Trame Noire est de lutter contre la fragmentation et la disparition des habitats, causes majeures de l'érosion de la biodiversité mondiale (Laforge et al., 2019), en intégrant les effets néfastes de la pollution lumineuse (Sordello, 2017b, 2017c).

En France, plusieurs initiatives ont été mises en place pour développer des trames noires. Des parcs nationaux ont obtenu des labels pour protéger la nuit et l'obscurité en tant que patrimoine culturel et naturel. De nombreuses villes ont élaboré des trames sombres en étudiant l'activité des chauves-souris et en identifiant les luminaires perturbateurs. Des projets ont également été lancés pour adapter l'éclairage nocturne afin de minimiser ses impacts sur la biodiversité.

La trame noire s'inscrit dans le cadre général de la TVB, visant à mieux prendre en compte la biodiversité dans l'aménagement du territoire. Cette politique est intégrée dans des documents de planification tels que les Schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET), les Schémas de cohérence territoriale (SCoT) et les Plans locaux d'urbanisme (PLU). Cependant, la prise en compte de la pollution lumineuse comme frein au déplacement des espèces a longtemps été timide, nécessitant l'intervention d'acteurs locaux comme les villes, agglomérations et parcs naturels pour initier des démarches de trame noire.

L'identification de la trame noire peut se faire en sélectionnant les zones les plus obscures de la trame verte et bleue existante ou en intégrant l'obscurité comme critère dans la modélisation de la trame écologique. La trame noire pose des défis en termes de gouvernance, nécessitant la coopération de divers acteurs pour mettre en place des politiques efficaces. Les législations nationales et directives européennes jouent un rôle crucial dans la réduction de l'éclairage artificiel. La France dispose de législations avancées depuis 2018 pour protéger les environnements nocturnes.



Figure 8 : Niveau de la pollution lumineuse en France métropolitaine

Sources : DarkSkyLab ; ONB ;

Auteur : Olivier Debufuse

Sensibilisation et Engagement Communautaire

La sensibilisation et l'engagement communautaire sont essentiels pour lutter contre la pollution lumineuse. Les communautés peuvent adopter des pratiques d'éclairage responsables et participer à des initiatives locales pour réduire la lumière intrusive. Des programmes éducatifs et des campagnes de sensibilisation, comme ceux promus par les organisations de protection du ciel nocturne, aident à informer le public sur les avantages de réduire la pollution lumineuse et à encourager des comportements respectueux de l'environnement. La protection des cieux nocturnes ne bénéficie pas seulement aux astrotouristes, mais aussi aux résidents locaux, améliorant leur qualité de vie et leur santé (Stimac, 2019).

La collaboration entre les pouvoirs publics, les scientifiques, les urbanistes et les communautés locales est essentielle pour mettre en place des stratégies de gestion efficaces. La recherche continue à jouer un rôle crucial dans la compréhension et la gestion de la pollution lumineuse. La modélisation et la cartographie de la pollution lumineuse fournissent des outils précieux pour prédire les effets des décisions liées à l'éclairage et identifier les zones prioritaires pour les interventions (Deverchère, Vauclair & Bonavitacola, 2017).

LED, Sodium et Iodure : Lumière et Conséquences Écologiques

Les LED et la Pollution Lumineuse

Les lampes LED, largement privilégiées pour leur efficacité énergétique et leur capacité à restituer fidèlement les couleurs, ont connu une évolution significative. Initialement monochromatiques, émettant des couleurs telles que le rouge, le vert ou le bleu, les LED modernes utilisent des poudres fluorescentes encapsulées pour produire de la lumière blanche.

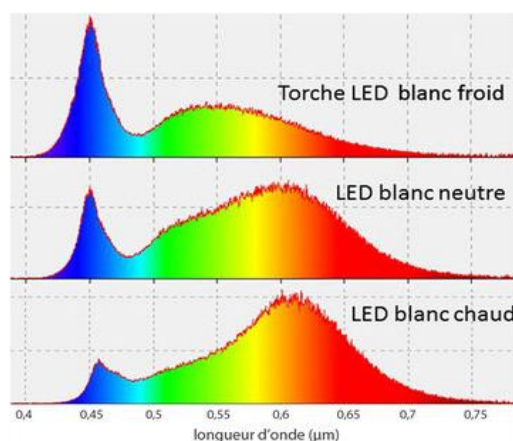


Figure 9 : Signature spectrale des différents types de LED

Source : [Les différentes sources de lumière - 1,2,3 Couleurs ! Expériences scientifiques et boutique sur la couleur \(123couleurs.fr\)](#)

Ce processus consiste à convertir le rayonnement bleu initial, émis par le semi-conducteur, en un spectre de lumière blanche (Sordello et al., 2018). La température de couleur des LED blanches varie, influençant leur spectre d'émission : les LED blanches froides affichent des températures de couleur élevées (7000-7500 K), tandis que les LED blanches chaudes se situent dans une plage plus basse (3000-3500 K). Ces différences ont des impacts environnementaux distincts.

Les LED blanches, bien que très efficaces, émettent une proportion significative de lumière bleue, surtout les variantes froides. Or nous avons vu que cette composante bleue peut perturber les rythmes circadiens des êtres humains et des animaux. Mais les LED peuvent être fabriquées pour émettre dans une gamme spécifique de températures de couleur, offrant une grande flexibilité d'application. Cependant, cette flexibilité nécessite une attention particulière en raison de leurs impacts écologiques.

Les impacts des LED sur la biodiversité sont diversifiés. La composante bleue des LED blanches froides est particulièrement nuisible pour la faune, la flore et les êtres humains, car elle peut altérer les rythmes biologiques et les cycles de reproduction des espèces. Par exemple, la lumière bleue attire et désoriente les insectes nocturnes, perturbant les écosystèmes qui dépendent de ces insectes pour la pollinisation et comme source de nourriture pour d'autres animaux. Les oiseaux migrateurs, qui utilisent la lumière naturelle pour naviguer, peuvent également être désorientés par les éclairages LED, entraînant des collisions avec des structures artificielles et des perturbations de leurs routes migratoires. En réponse à ces préoccupations, des LED ambrées ont été développées pour réduire l'impact environnemental. Ces LED ambrées éliminent la composante bleue du spectre tout en maintenant une bonne efficacité énergétique et un bon rendu de couleur (Sordello et al., 2018).

Un autre aspect des LED est leur forte luminance. Contrairement aux lampes à vapeur de sodium, qui émettent de la lumière à partir de sources plus grandes et diffuse, les LED émettent de la lumière à partir de surfaces très petites, augmentant ainsi la luminance et, par conséquent, l'éblouissement. Cela pose des problèmes uniques pour la faune nocturne, qui peut être désorientée par ces sources de lumière extrêmement brillante. Cette désorientation peut perturber leurs comportements naturels, tels que la chasse et la migration, affectant ainsi les équilibres écologiques.

Lampes Sodium Haute Pression

Les lampes Sodium Haute Pression (SHP) offrent une meilleure restitution des couleurs que les lampes à sodium basse pression et sont couramment utilisées en raison de leur bon rendement énergétique et de leur capacité à restituer les couleurs. Cependant, elles ont un impact significatif sur la biodiversité végétale, provoquant des floraisons et fructifications prématurées (MEB - ANPCEN, 2015).

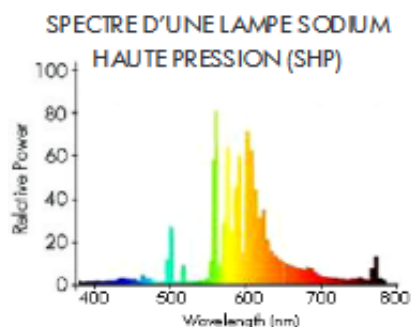


Figure 10 : Spectre d'une lampe à sodium haute pression

Source : [Lampe à vapeur de sodium — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

Les SHP émettent une lumière jaune-orange qui, bien que moins disruptive que la lumière bleue des LED, peut encore altérer les comportements nocturnes des animaux et des plantes. Leur spectre d'émission limitée peut également avoir des effets négatifs sur la perception visuelle et la santé humaine à long terme.

Lampes à Iodure Métallique

Les lampes à Iodure Métallique, référencées comme blanches, offrent une bonne restitution des couleurs, avec un spectre d'émission plus large comprenant des longueurs d'onde présentant de fortes raies dans le vert, le jaune et le rouge. Cela leur permet de fournir un éclairage plus naturel et une meilleure restitution des couleurs, ce qui les rend populaires dans les applications nécessitant un rendu des couleurs précis, comme l'éclairage commercial et résidentiel.

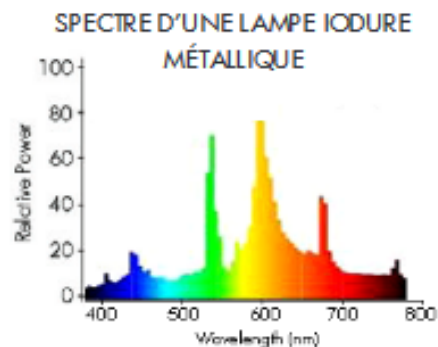


Figure 11 : Spectre d'une lampe à iodure métallique

Source : [Lampe à vapeur de sodium — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

Cependant, elles sont moins efficaces énergétiquement et sont très impactantes sur la biodiversité, activant des mécanismes normalement diurnes comme la photosynthèse (Boyes et al., 2020). Ces lampes peuvent entraîner des changements comportementaux chez les animaux nocturnes, perturbant leur chasse et leur reproduction.

Cartographie et Modélisation de la Pollution Lumineuse : Enjeux, Méthodes et Applications

La cartographie de la pollution lumineuse est cruciale pour comprendre les caractéristiques de cette pollution à différentes échelles et son évolution au fil du temps. Selon Deverchère, Vauclair et Nguyen Duy-Bardakji (2018), les bases de données SIG sont de plus en plus complètes et accessibles, permettant de réaliser des cartes de pollution lumineuse par la modélisation de la diffusion de la lumière dans l'atmosphère. Ces cartes permettent de prédire les impacts positifs ou négatifs des décisions liées à l'éclairage, en intégrant des données écologiques pour définir des trames sombres. La trame sombre peut être vue comme un réseau formé de continuités écologiques terrestres et aquatiques auxquelles on ajoute la pression de la pollution lumineuse.

Les outils de simulation représentent une étape essentielle pour mesurer et prédire l'impact écologique, économique et environnemental de l'éclairage public et privé. Deverchère et Vauclair (2019) mentionnent l'utilisation de modèles de simulation développés par DarkSkyLab pour réaliser des diagnostics d'éclairage. Ces outils permettent d'identifier les zones à enjeux où des actions de conversion doivent être menées en priorité pour restaurer la trame sombre. Ils sont également utilisés pour minimiser les impacts environnementaux et mieux contrôler les budgets des collectivités locales dédiés à l'éclairage.

La combinaison de différentes sources de données est souvent nécessaire pour modéliser de manière réaliste la pollution lumineuse sur un territoire. Des études, telles que celles de Levin et al. (2020), montrent que les capteurs de nuit destinés à mesurer la radiance de tout type d'éclairage au sol doivent disposer d'une plage dynamique de mesure très grande. Cependant, même avec des capteurs sophistiqués, certaines zones non éclairées peuvent être sous-exposées. Les données radiance satellite, combinées avec des mesures au sol, permettent une modélisation plus précise et une meilleure compréhension des impacts de la pollution lumineuse.

La modélisation de la pollution lumineuse est un outil précieux pour comprendre ses causes et ses impacts, ainsi que pour guider les décisions politiques et les interventions de conservation (Deverchère et al., 2018). Les méthodes de modélisation utilisent des données géographiques et des techniques de simulation pour cartographier la répartition de l'éclairage artificiel dans

l'environnement. Ces méthodes comprennent la modélisation de la diffusion de la lumière dans l'atmosphère, l'intégration de données satellitaires et la simulation des effets de différents types d'éclairage sur l'environnement nocturne (Deverchère et al., 2019).

La modélisation de la pollution lumineuse est utilisée dans divers domaines, notamment la planification urbaine, la conservation de la biodiversité et la recherche scientifique (Deverchère et al., 2018). Ces modèles permettent d'identifier les zones à risque de pollution lumineuse, d'évaluer l'efficacité des politiques d'éclairage et de prédire les effets de la pollution lumineuse sur les écosystèmes et la santé humaine (Deverchère et al., 2019). Malgré leurs avantages, les modèles de pollution lumineuse présentent également des défis et des limitations. La précision des prévisions dépend de la qualité des données d'entrée et de la complexité des interactions entre l'éclairage artificiel, l'environnement et la biodiversité (Deverchère et al., 2019). De plus, la modélisation ne prend pas toujours en compte les variations locales et les facteurs socio-économiques qui influent sur la pollution lumineuse (Deverchère et al., 2018).

La pollution lumineuse peut être mesurée à l'aide d'instruments spécialisés tels que les luxmètres et les photomètres. Ces appareils permettent de quantifier l'éclairement lumineux dans différents environnements et de cartographier les zones présentant un éclairage excessif. La mesure de la pollution lumineuse est essentielle pour évaluer l'impact de l'éclairage artificiel sur les écosystèmes et pour développer des stratégies de gestion efficaces.

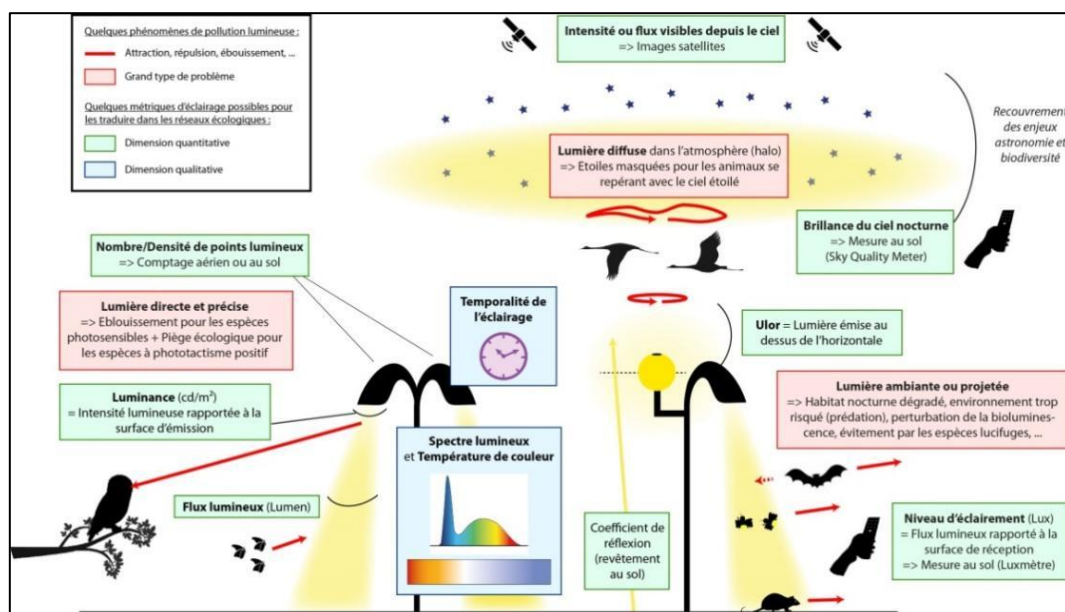


Figure 12 : Variables d'éclairage à considérer dans un réseau écologique

Auteur : Sordello, 2017

Matériel & Méthode :

Mon objectif était de comparer l'image satellite Jilin de la pollution lumineuse nocturne de 2020 de l'Eurométropole de Strasbourg avec des mesures spatialisées effectuées au sol à l'aide d'un luxmètre-chromamètre. Cette comparaison visait à évaluer l'impact des différentes sources de pollution lumineuse, et à cartographier la distribution spectrale de cette pollution.

La collecte des données de terrain impliquait que je mesure l'intensité lumineuse et les longueurs d'onde (bleu, vert, rouge) à différents points des sites sélectionnés. J'ai utilisé une approche systématique pour assurer la représentativité des mesures. Cela incluait la détermination d'une grille régulière de points de mesure ou des zones circulaires avec des pas définis autour des sources lumineuses. Les mesures devaient être prises à des hauteurs standardisées pour minimiser les variations dues à la proximité immédiate des sources lumineuses. Chaque point de mesure devait être enregistré avec précision en utilisant un GPS pour permettre une analyse spatiale rigoureuse.

Préparation et planification

La première étape pour moi a été d'identifier les sites d'intérêt dans l'Eurométropole de Strasbourg, en me concentrant sur les zones équipées de lampadaires LED, car ces zones sont représentatives des politiques récentes d'éclairage public. Il était crucial d'obtenir les données les plus récentes de l'implantation des lampadaires auprès de l'Eurométropole de Strasbourg, car ces données sont sujettes à des changements rapides en raison des mises à jour de l'infrastructure.

Pour cela, je possédais une base de données sur l'éclairage public fourni par l'Eurométropole qui est venue s'ajouter à l'image satellite. Cette base de données fournit beaucoup d'informations sur les points lumineux toutefois, notamment le type d'éclairage, ce qui nous intéressait pour planifier les campagnes de relevés de terrain. Il s'agit de 31 873 points situés dans la commune de Strasbourg et représente uniquement de l'éclairage public.

On retrouve 10 différents types d'éclairage (notamment des IM, LED, SHP) (voir annexe 2 ;3 ;4 ;5) :

- Cosmowite
- Fluocompact
- Gaz
- Halogène
- IM = Iodure Metallique
- Induction
- LED : Light Emitting Diode (diode électroluminescente)
- SHP = Sodium Haute Pression
- TF : Tri-Phosphor Fluorescent
- XENON

Ce sont les lampes de type LED qui nous intéressaient particulièrement, en raison de leur remplacement progressif d'autres types d'éclairage et de leur impact significatif dans le spectre bleu.

Collaboration :

Ce stage, qui a bénéficié de collaborations avec le projet EvolVille, a été réalisé en partenariat avec l'Eurométropole de Strasbourg, la Zone Atelier Environnementale Urbaine, l'Office Français de la Biodiversité et le Laboratoire Ecologie, Systématique et Evolution de l'Université Paris Saclay. Le projet EvolVille se concentre sur la biodiversité (flore, insectes, chauves-souris et oiseaux) ainsi que sur les conditions environnementales locales (température, hygrométrie, sol).

Pour enrichir la compréhension de ces environnements, des nichoirs ont été installés dans différents sites de l'Eurométropole (figure 13). Leur souhait était de pouvoir faire des mesures d'intensités lumineuses auprès de ces nichoirs.

La première étape de mon travail consistait à repérer des sites utilisant des LED à proximité de ces points. Deux zones ont convenu, la première se situe au parc de l'Orangerie (point 1 sur la carte), et la seconde près de la station de tram Starcoop (point 2 sur la carte, Figure 13).



Figure 13 : Carte des localisations de nichoir placé dans l’Eurométropole de Strasbourg
 Source : IGN ; Eurométropole de Starsbourg ; EvolVille ; Image satellite

Auteur : Guillaume Yléann

Fond de carte : Google Satellite ; Google Maps

Un troisième site a également été étudié : il s’agit de la rue d’Oslo, située à proximité du laboratoire LIVE (point 3 sur la carte) (figure 14)



Figure 14 : Carte des sites sur lesquels nous avons effectué des relevés Luxmètre et GPS

Source : IGN ; Eurométropole de Starsbourg

Auteur : Guillaume Yléann

Fond de carte : Google Satellite ; Google Maps

Relevés de terrain réalisés

Une fois les zones d'étude identifiées, j'ai utilisé QGIS pour effectuer un quadrillage précis des zones prédéfinies avec des carrés de 6 m². J'ai également créé une couche de points afin de déterminer le nombre de points de mesure nécessaires pour le luxmètre.

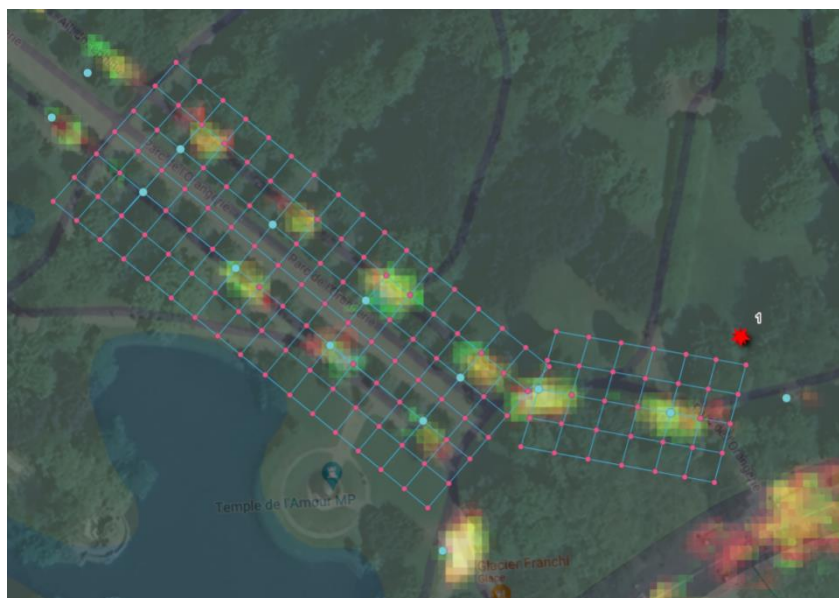


Figure 15 : Quadrillage de la zone (site de l'Orangerie) réalisé sur Qgis

Source : Eurométropole de Starsbourg ; EvoVille ; Image satellite

Auteur : Guillaume Yléann

Fond de carte : Google Satellite ; Google Maps

La première zone d'étude, au parc de l'Orangerie à Strasbourg.

Pour anticiper les imprévus tels que l'extinction des lumières, des lieux trop sombres, des fermetures de parcs ou des changements d'éclairage, nous avons également prévu 2 à 3 sites de secours.

Lors de notre première sortie sur le terrain à 22h, nous avons rencontré un problème : l'éclairage du parc s'est éteint à 23h. Cet imprévu nous a obligés à revoir notre méthode de relevés. Nous avons alors décidé de nous retrouver plus tôt dans la journée pour quadriller la zone de manière plus méthodique.



Figure 16 : Marquage au sol des points à relevés

Auteur : Guillaume Yléann

Pour une meilleure précision, nous avons placé des repères tous les 3 mètres (piquets dans la pelouse ou marquages au sol). Nous avons également pris des points GPS à l'avance, mais

seulement aux extrémités, car la collecte de chaque point peut prendre environ dix minutes. Ainsi, une fois la nuit tombée vers 22h, nous pouvions nous concentrer uniquement sur les mesures de luminosité.

Avec cette nouvelle organisation, nous avons pu réaliser un relevé de 152 points en une seule nuit. Chaque mesure avec le luxmètre prenait environ 20 à 30 secondes.

Sur le terrain, il est crucial de préparer l'équipement avec soin. Cela inclut le luxmètre-chromamètre, qui doit être précisément calibré pour garantir la fiabilité des mesures, ainsi que le GPS. Avant la collecte des données, nous avons délimité une zone avec une ficelle marquée de nœuds tous les 3 et 6 mètres pour faciliter le quadrillage et le placement des marqueurs à chaque point de mesure.

luxmètre-chromamètre

Nous avons utilisé un luxmètre-chromamètre² CL-70F de la marque KONICA MINOLTA (figure 17). Un luxmètre-chromamètre est un outil polyvalent essentiel pour étudier la pollution lumineuse en milieu urbain. Ce dispositif combine les capacités d'un luxmètre, qui mesure l'éclairement lumineux en lux, et d'un chromamètre, qui évalue les caractéristiques chromatiques de la lumière. En utilisant cet appareil, cela nous permet de quantifier à la fois la quantité de lumière incidente sur une surface donnée et les propriétés spectrométriques de cette lumière, telles que sa température de couleur et son indice de rendu des couleurs (IRC).



Figure 17 : Utilisation d'un Luxmètre-Chromamètre

Auteur : Guillaume Yléann

Cet appareil a permis de mesurer une gamme étendue de paramètres liés à la lumière. Les principaux paramètres mesurés incluent :

- **L'éclairement lumineux** : L'éclairement lumineux, ou "illuminance" en anglais, est une mesure de l'intensité de la lumière perçue par l'œil humain sur une surface donnée. Nous avons mesuré cet éclairement sur une échelle de 0 à 100, bien qu'il soit

² - Le luxmètre est un capteur, qui permet de mesurer l'éclairement lumineux reçu par unité de surface dans le spectre visible.

- Le chromamètre est un appareil de mesure permettant de déterminer très précisément la couleur d'une surface. Le chromamètre peut définir la couleur, mais également l'intensité de cette couleur. La mesure chromatique obtenue est exprimée en RVB (pourcentage de rouge, vert, et bleu).

également possible de le représenter sur une plage de 0 à 1. Cette mesure est cruciale pour comprendre la distribution de la lumière dans différents environnements.

- **La longueur d'onde** : Cette mesure identifie la longueur d'onde avec l'intensité la plus élevée dans le spectre de la lumière, ce qui est essentiel pour analyser les sources lumineuses et leur impact sur divers matériaux et environnements.
- **Les valeurs CIE 1931 XYZ** : Ce système trichromatique, adopté par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) en 1931, permet de quantifier les couleurs perçues en utilisant trois valeurs (X, Y, Z). Ces valeurs sont fondamentales pour des applications de colorimétrie et pour garantir la cohérence des couleurs dans différentes conditions de lumière.
- **Les valeurs CIE 1976 UV** : Ces valeurs, basées sur le diagramme de chromaticité de 1976, offrent une échelle où les différences de couleurs sont proportionnelles à la distance géométrique sur le diagramme. Cela permet une meilleure évaluation des variations de couleur sous différentes illuminations.
- **Les valeurs de longueurs d'ondes par intervalles de 1nm et de 5 nm** : Mesurer les longueurs d'ondes à ces intervalles précis nous permet d'obtenir un spectre détaillé de la lumière, essentiel pour des analyses approfondies des propriétés spectrales des sources lumineuses.

Pour toute la durée de l'intervention, nous avons utilisé un angle de mesure de 2°, paramètre par défaut de l'appareil, car notre étude ne nécessitait pas un angle spécifique. De plus, le mode de mesure était réglé sur "ambient" pour éviter toute correction automatique pouvant fausser les données.

L'atout principal de ce luxmètre-chromamètre réside dans sa capacité à référencer les mesures effectuées dans différents systèmes de couleurs, comme le CIE 1931, et à exporter ces mesures sous forme de tableaux et de graphiques. Cette fonctionnalité nous a permis d'analyser le spectre de diffusion de la lumière recueilli lors de nos sorties sur le terrain.

GPS

Pour corrélérer les points mesurés avec le luxmètre à des points GPS dans QGIS, nous avons utilisé un GNSS Trimble GeoExplorer XH 6000 (figure 18). Cet appareil est spécifiquement conçu pour des opérations en environnements urbains où la réception satellite est souvent masquée par des obstacles tels que des arbres et des bâtiments.

Caractéristiques et Utilisation du GNSS Trimble GeoExplorer XH 6000

Le Trimble GeoExplorer XH 6000 offre une précision centimétrique après post-traitement, capturant uniquement les signaux des constellations GPS américaines et GLONASS russes. Sa précision horizontale, utilisant l'antenne interne, est de $2,5 \text{ cm} + 1,2 \text{ ppm}$, ce qui est essentiel pour notre étude étant donné que la résolution spatiale de notre image satellite est de 1,5 m. Bien que la précision altimétrique ne soit pas critique pour notre recherche, la précision horizontale est primordiale pour garantir des corrélations précises entre les mesures de lumière et les positions GPS.



Figure 18 : Utilisation d'un GPS Geo Explorer
Auteur : Guillaume Yléann

Deuxième zone d'étude : Station de Tram « Starcoop » à Strasbourg

La deuxième zone d'étude se situe à la station de tram "Starcoop" à Strasbourg. Cette station a été choisie en raison de sa proximité avec un nichoir et des lampadaires LED présents le long de la station. Les relevés ont été effectués de 23h à 1h du matin, bien que les lumières ne semblent pas s'éteindre après cette heure.

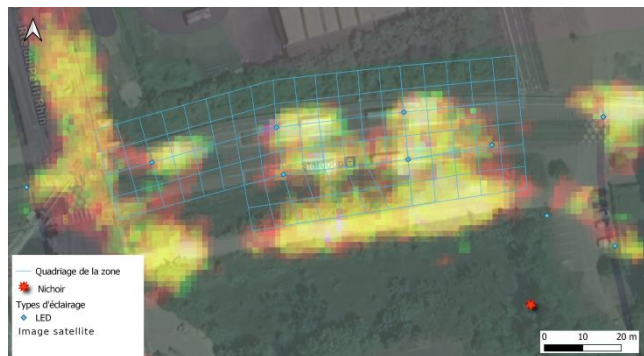


Figure 19 : Quadrillage de la zone (site : station de tram Starcoop) réalisé sur Qgis

Source : Eurométropole de Starsbourg ; EvolVille ; Image satellite

Auteur : Guillaume Yléann

Fond de carte : Google Satellite ; Google Maps

Travailler sur cette zone présentait plusieurs particularités. Étant donné que nous réalisons des mesures tous les 3 mètres, nous avons dû effectuer des relevés sur les trottoirs du tram et au milieu des rails, nécessitant une attention constante aux trams arrivants et à la foule passante. De plus, une troisième rangée de lampadaires se trouve dans cette zone, dont les données ne figurent pas sur la couche d'éclairage public fournie par la métropole de Strasbourg. Il s'agit probablement d'un éclairage privé sur lequel nous n'avons pas d'informations, mais il était crucial de les inclure dans nos relevés, car ils sont les plus proches du nichoir.

Il était également important de considérer que les phares des trams pourraient perturber les relevés pris par le luxmètre. Au total, 64 points de mesure ont été relevés sur ce site.

Troisième zone d'étude : Rue d'Oslo à Strasbourg

La troisième zone d'étude se trouve rue d'Oslo à Strasbourg. Bien que cette rue soit à proximité du laboratoire LIVE et qu'il n'y ait pas de nichoir à proximité, nous avons choisi de réaliser ces relevés pour enrichir nos données. Cette zone est particulièrement intéressante car elle se situe en ville, entourée de bâtiments, contrairement aux deux autres zones. Cela signifie que de nombreux éléments perturbateurs peuvent interférer avec les relevés.

Au total, 152 points de mesure ont été relevés sur ce site.



Figure 20 : Quadrillage de la zone (site : Rue d'Oslo)

Source : Eurométropole de Strasbourg ; EvoVille

Auteur : Guillaume Yléann

Fond de carte : Google Satellite ; Google Maps

Traitement des données sur Excel

L'analyse des données vise à créer des cartes interpolées par longueur d'onde, en testant différentes méthodes d'interpolation comme l'Inverse Distance Weighting (IDW) et le Krigeage pour déterminer la plus appropriée. Je vais comparer les mesures de terrain avec les images satellites pour comparer les données satellites avec les mesures de terrain pour déterminer leur complémentarité.

Après avoir extrait les fichiers du luxmètre à partir d'un logiciel spécifique, je me suis retrouvé avec des données présentées sous forme de fichiers Excel en format .CSV. Chaque fichier représentait un point de mesure, et mon objectif était de regrouper tous les points d'une zone en un seul fichier. Pour pouvoir importer ces données dans QGIS, il fallait respecter certaines conditions.

Pour automatiser ce travail et éviter de le faire manuellement, j'ai tout d'abord regroupé tous les fichiers nécessaires dans un dossier dédié. Cependant, les noms de fichiers contenaient des caractères spéciaux comme "-" et "°", ce qui posait problème pour l'utilisation de macros sur Excel. J'ai donc utilisé une fonction PowerShell (voir annexe 6) pour renommer tous les fichiers CSV dans ce répertoire en supprimant ces caractères indésirables.

Ensuite, j'ai créé une macro Excel (voir annexe 7) dans un nouveau classeur. Cette macro spécifiait le dossier contenant tous les fichiers à traiter. La première étape consistait à convertir les fichiers CSV en fichier XLSM. Bien que cela puisse sembler contradictoire puisque les fichiers devaient être en format CSV pour être lus dans QGIS, c'était essentiel pour la suite des traitements, car certains outils nécessitaient un format spécifique compatible avec les macros, comme le format "XLSM (Classeur prenant en charge les macros)".

J'ai défini le chemin du dossier contenant mes fichiers Excel à traiter. Ensuite, j'ai utilisé une fonction pour récupérer automatiquement le nom de chaque fichier dans ce dossier, me permettant ainsi de traiter tous les fichiers sans intervention manuelle.

La macro (voir annexe 8) sélectionnait la première feuille de chaque fichier. Ensuite, elle extrayait les données des colonnes A et B, de la ligne 1 à la ligne 530 (la dernière ligne contenant des données). Pour rendre ces données utilisables sous QGIS, j'ai programmé la macro pour supprimer les crochets, les guillemets et remplacer les points par des virgules dans les colonnes A et B.

Après le nettoyage des données, la macro créait une nouvelle feuille dans le fichier Excel et transposait les données des colonnes A et B. Cette étape était cruciale, car elle transformait les données verticales en données horizontales, sous forme d'une table attributaire. Après cela, j'avais deux lignes : la première pour les titres et la seconde pour les données.

Après la transposition, la première ligne de la nouvelle feuille était supprimée pour éliminer les en-têtes, ne laissant que les données. Une fois les modifications effectuées, la macro sauvegardait automatiquement les changements dans les fichiers Excel puis les fermait.

Enfin, j'ai utilisé une autre macro (voir annexe 9) pour regrouper toutes les fichiers en un seul. En fusionnant les données transposées de plusieurs fichiers Excel en un seul classeur, j'ai pu obtenir une seule ligne pour chaque point de mesure, et j'ai veillé à ce que chaque nouvelle ligne provenant d'un autre fichier soit placée en dessous de la précédente.

Une fois terminé je possédais donc un seul fichier Excel regroupant toutes les données d'une zone où ont été effectués des relevés que j'ai transformé au format CSV (point, virgule).

Ce processus automatisé m'a permis de consolider efficacement les données du luxmètre, facilitant ainsi leur analyse et leur utilisation ultérieure dans QGIS.

Traitement de données Qgis

GPS

Post-Traitement des Données GNSS

Pour améliorer la précision des données collectées sur le terrain, nous avons utilisé le logiciel GPS Pathfinder Office. Ce logiciel permet de corriger les fichiers RINEX enregistrés par l'appareil, ce qui est crucial pour contrôler et minimiser l'incertitude des mesures. L'un des avantages majeurs de GPS Pathfinder Office est sa capacité à corriger les erreurs de multi-trajets, un phénomène fréquent dans les environnements urbains où les signaux satellites peuvent être réfléchis par des bâtiments et d'autres structures.

Procédure de Post-Traitement des Données

- **Collecte des Données** : Les points GPS ont été collectés en utilisant le Trimble GeoExplorer XH 6000, capturant des coordonnées en temps réel.
- **Téléchargement des Fichiers RINEX** : Les données brutes GNSS enregistrées ont été téléchargées sous forme de fichiers RINEX.
- **Correction des Données** : En utilisant GPS Pathfinder Office, nous avons appliqué des corrections différentielles pour améliorer la précision des positions enregistrées.

Le logiciel permet également de contrôler l'incertitude des mesures et de corriger les erreurs de multi-trajets.

- **Amélioration de la Précision** : Le post-traitement a permis d'améliorer considérablement la précision des données collectées, passant d'une précision autonome à une précision décimétrique (environ 10 cm) en fonction de l'environnement et des conditions de réception.

Limitations et Considérations

La précision de nos mesures a été principalement affectée par les conditions environnementales (météo, bâtiments autour). Cependant, grâce au post-traitement, nous avons réussi à obtenir une précision suffisante pour notre étude, avec des erreurs réduites à un niveau centimétrique.

Interpolation

Étant donné que nous avons pris les points GPS uniquement aux extrémités du terrain, j'ai utilisé les fonctionnalités de QGIS pour créer des points à des distances régulières où nous avons effectué les relevés avec le luxmètre. Cette étape a permis de générer un réseau de points de mesure de manière systématique.

Ensuite, j'ai réalisé une jointure avec les données Excel contenant les relevés de luminosité. Cela a intégré les valeurs de luminosité aux points créés dans QGIS. Enfin, j'ai effectué différents tests d'interpolation pour voir lequel est le meilleur pour visualiser et analyser les variations spatiales de la pollution lumineuse.

Réseau Irrégulier Triangulé (TIN³)

La méthode TIN consiste à créer une surface formée de triangles en connectant les points les plus proches.

1. **Création de cercles concentriques** : Autour de chaque point échantillonné sont dessinés des cercles.
2. **Intersection et connexion des points** : Les intersections de ces cercles avec les points voisins sont connectées pour former des triangles.
3. **Formation du réseau** : Ce réseau de triangles ne se chevauche pas et est aussi compact que possible.

³ Source : https://docs.qgis.org/2.18/fr/docs/user_manual/plugins/plugins_interpolation.html

Résultat : Les surfaces créées ne sont pas lisses mais plutôt anguleuses à cause des triangles.

Distance Inverse Pondérée (IDW)

La méthode IDW utilise une approche différente pour créer une surface lisse.

1. **Pondération des points** : Chaque point échantillonné a une influence sur la surface ; cette influence diminue avec la distance par rapport au point à interpoler.
2. **Calcul de la surface** : On utilise ces pondérations pour calculer les valeurs des nouveaux points.

Avantages :

- Cela permet de créer des surfaces lisses.

Inconvénients :

- Si les points de données sont irrégulièrement répartis, la qualité de l'interpolation peut diminuer.
- Les valeurs maximales et minimales ne se produisent qu'aux points de données échantillonnés, ce qui peut créer des petits pics et creux autour de ces points.

En Résumé

- **TIN** crée des surfaces anguleuses en formant des triangles avec les points les plus proches.
- **IDW** crée des surfaces lisses en pondérant les points selon leur distance.

Options pour les longueurs d'onde :

Pour l'interpolation, en utilisant les longueurs d'onde, j'avais plusieurs options à considérer, surtout en voulant créer trois types de couches (bleu, vert, rouge).

Utiliser une longueur d'onde spécifique par couleur :

- Bleu : 450 nm
- Vert : 550 nm
- Rouge : 650 nm

Cette approche pouvait simplifier l'analyse et l'interpolation, mais elle comportait le risque de perdre des informations contenues dans d'autres longueurs d'onde proches. Cependant, cela peut être utilisé pour comparer la sensibilité des espèces. Par exemple, les lampadaires émettant dans les spectres du vert, du bleu et de l'ultraviolet (soit environ de 380 à 585 nm) attirent fortement les insectes. Cependant, les abeilles ont un pic de sensibilité spectrale autour de 540 nm, mais ce pic de sensibilité varie chez d'autres espèces d'insectes, ainsi que chez les oiseaux et les mammifères.

Utiliser une gamme de longueurs d'onde pour chaque couleur :

- Bleu : 400-500 nm
- Vert : 500-600 nm
- Rouge : 600-700 nm

Cette méthode permet de capturer une plage plus large de données pour chaque couleur, ce qui pourrait améliorer la précision de l'interpolation. Cependant, cela rend le processus d'interpolation plus complexe du fait qu'il faille rentrer manuellement chaque longueur d'onde et non sélectionner directement l'ensemble des longueurs d'onde qui nous intéressent.

Utiliser la moyenne des longueurs d'onde par couleur :

- Bleu : moyenne de 400-500 nm
- Vert : moyenne de 500-600 nm
- Rouge : moyenne de 600-700 nm

Cette méthode consiste à utiliser la valeur moyenne de chaque plage de longueurs d'onde pour représenter les couleurs bleu, vert et rouge. Cette approche simplifie l'analyse en réduisant le nombre de points de données, ce qui facilite l'interpolation. Cependant, l'inconvénient est que l'utilisation de moyennes peut entraîner une perte de détails et ne pas capturer pleinement la variabilité spectrale présente dans les données brutes.

Par rapport aux valeurs du satellite⁴:

- B1 (Bleu) : 460 - 520 nm
- B2 (Vert) : 510 - 580 nm
- B3 (Rouge) : 630 - 690 nm

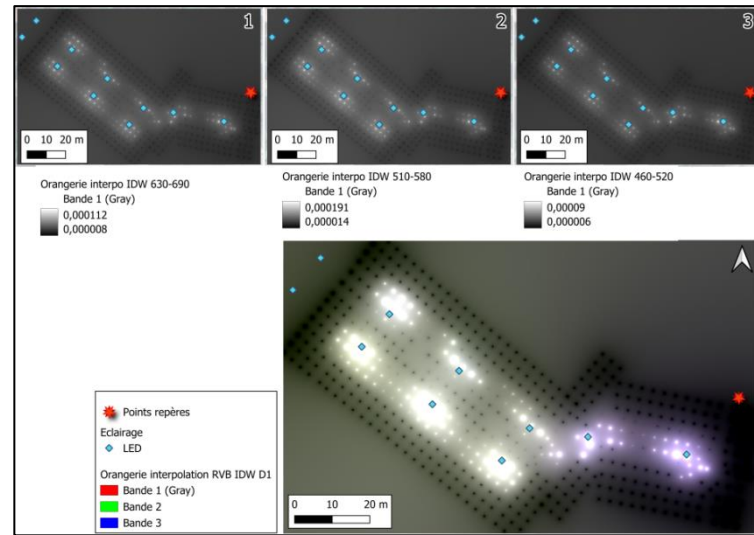
Pour cette méthode, nous utilisons les bandes spectrales telles que définies par les capteurs satellites. C'est cette méthode que nous avons choisie, car elle nous permettait de comparer directement l'interpolation avec les images satellites. En utilisant les mêmes plages de longueurs d'onde que celles capturées par les satellites, nous avons pu évaluer plus précisément la correspondance et la précision de notre interpolation par rapport aux données satellitaires.

⁴ https://catalyst.earth/catalyst-system-files/help/references/gdb_r/Jilin-1-07B.html

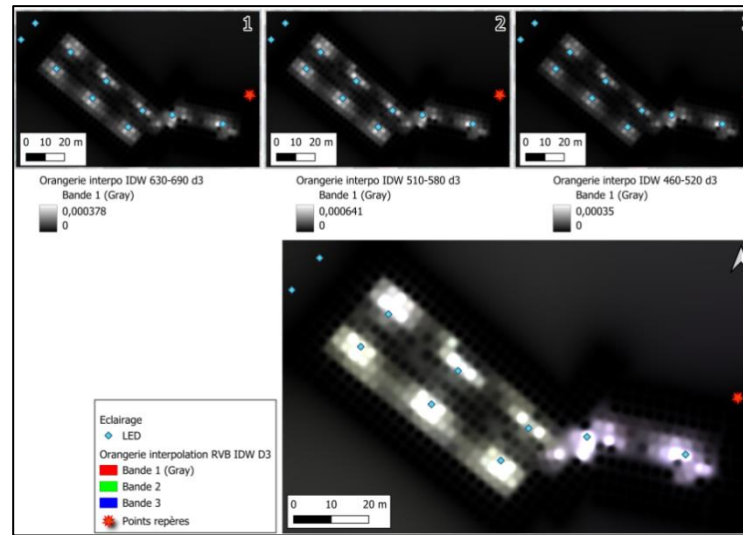
Site / Interpolation

Orangerie

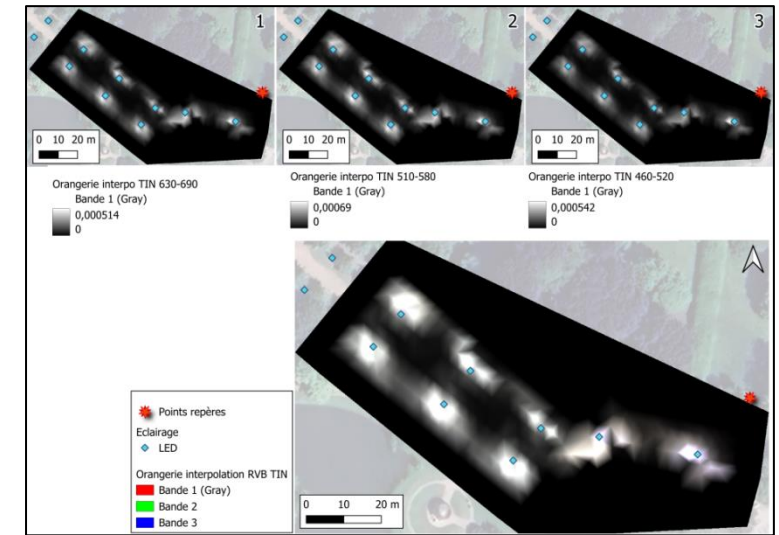
IDW 1m



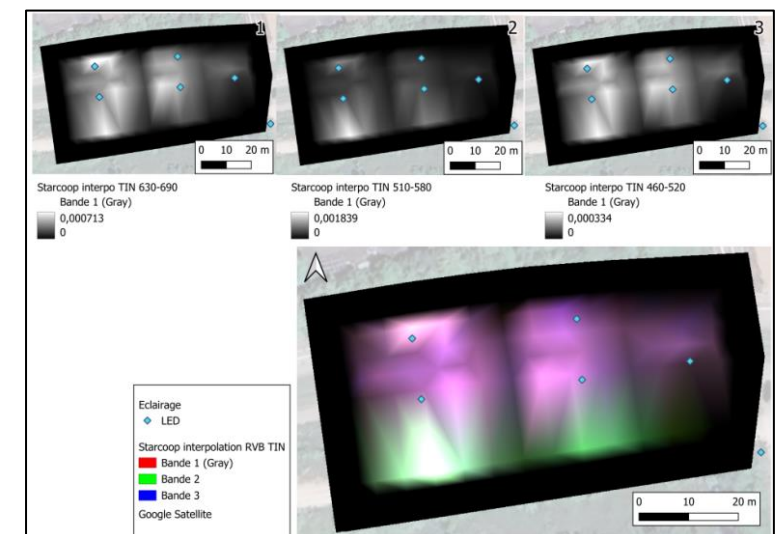
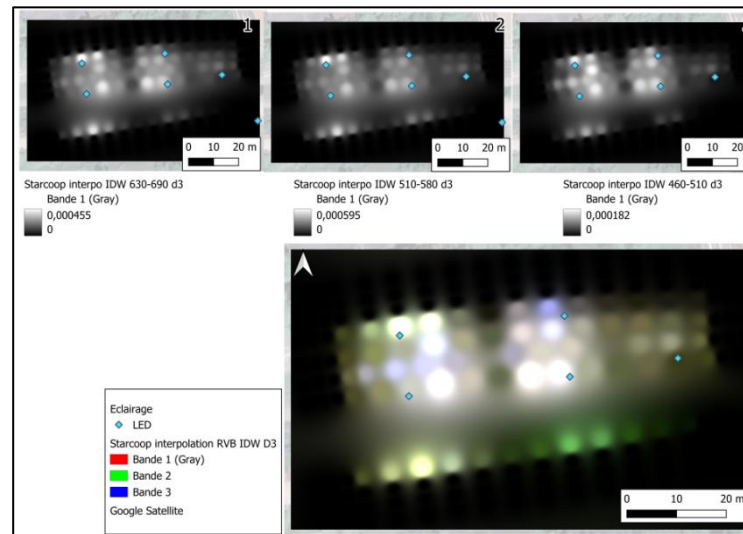
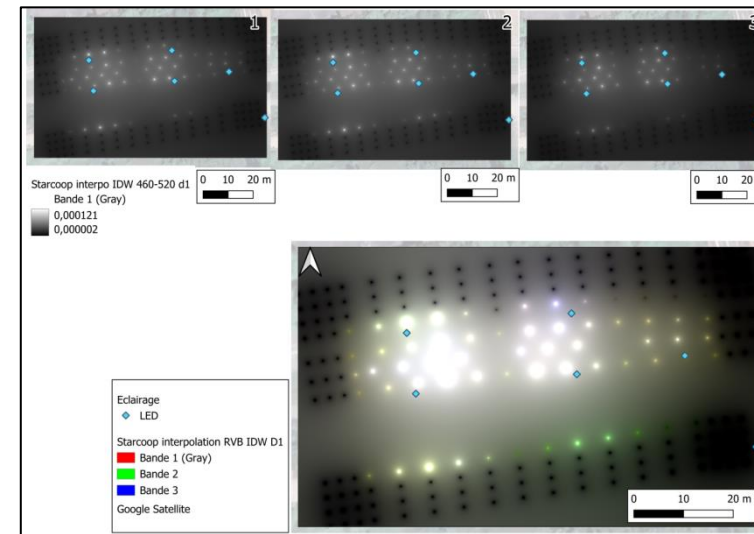
IDW 3m



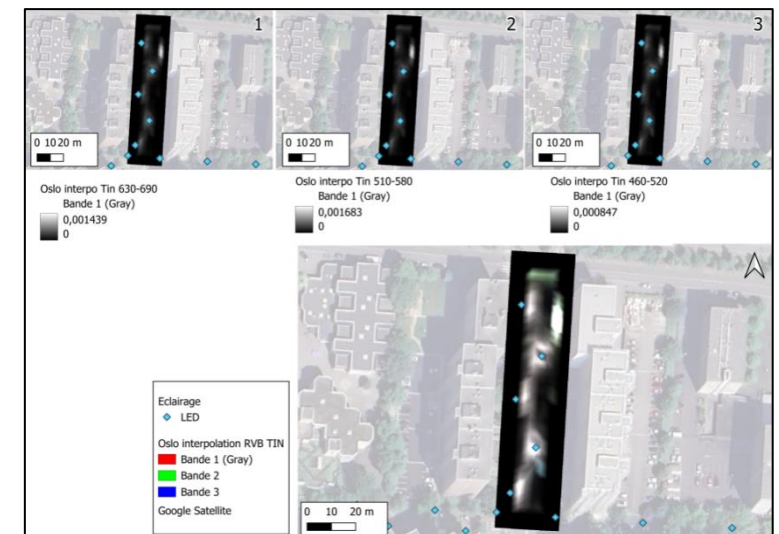
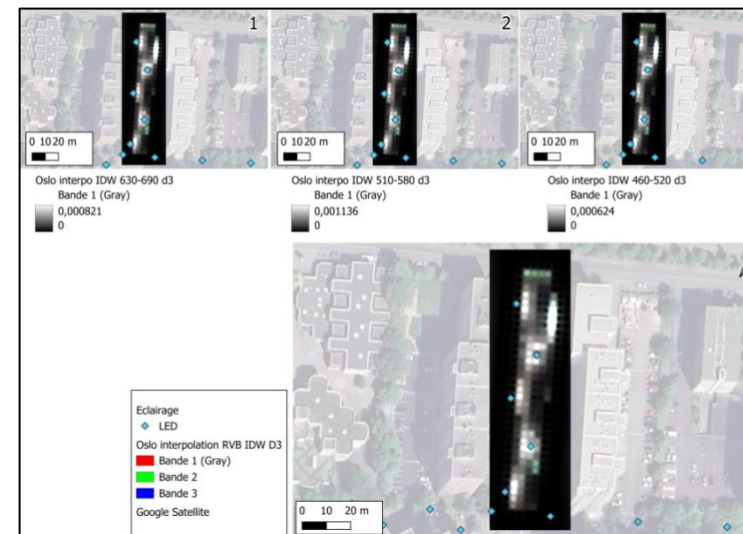
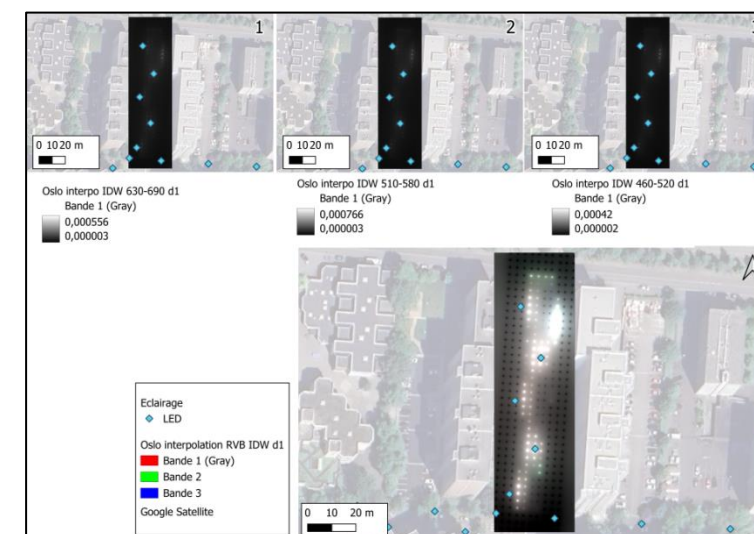
TIN



Starcoop



Oslo



Traitement de données

Pour comparer les résultats entre une image satellite et une image prise au sol avec un luxmètre, j'ai réalisé plusieurs manipulations cartographiques. Étant donné que l'image satellite était déjà traitée, je me suis basé sur ces données pour adapter celles prises avec le luxmètre.

Étape 1 : Uniformisation de la taille des pixels

Comme les pixels de l'image satellite correspondent à des surfaces de 1 m², j'ai cherché à avoir la même taille de pixels pour l'image prise au sol lors de l'interpolation. Cela facilitait les comparaisons entre les deux jeux de données.

Étape 2 : Interpolation des valeurs spectrales

Lors de l'interpolation, j'ai utilisé les valeurs en nanomètres (nm) des bandes spectrales de l'image satellite, spécifiquement :

- Pour le bleu : de 460 à 520 nm
- Pour le vert : de 510 à 580 nm
- Pour le rouge : de 630 à 690 nm

Les données ont été échantillonnées tous les 5 nm.

Étape 3 : Conversion des types de données

Les bandes de l'image satellite étaient en RVB (rouge, vert, bleu) et codées sur 8 bits⁵, avec des valeurs allant de 0 à 255. En revanche, les bandes des couches interpolées à partir des données du luxmètre étaient en float64⁶.

Pour réaliser cette conversion, j'ai utilisé la calculatrice raster avec la formule suivante :

$$\text{valeurs de la couche luxmètre} \times \left(\frac{255}{\text{valeurs maximales de la bande de la couche luxmètre}} \right)$$

⁵ Format 8 bits

Un format 8 bits signifie que chaque pixel de l'image est représenté par un octet (8 bits).

- Les valeurs vont de 0 à 255, soit 282⁸28 valeurs possibles.
- Ce format est couramment utilisé pour représenter des images en niveaux de gris ou en couleurs (pour chaque canal de couleur : rouge, vert et bleu).

⁶ Format float64

Le format float64 (ou double précision) est un type de donnée utilisé pour représenter des nombres à virgule flottante.

Ce format peut représenter une très grande plage de valeurs, allant de $\pm 1.8 \times 10^{-308}$ à $\pm 1.8 \times 10^{308}$, avec une précision de 15 à 17 chiffres significatifs.

Cette opération a normalisé les valeurs entre 0 et 255. Ensuite, j'ai utilisé un outil de conversion GDAL pour passer de float64 à 8 bits.

Étape 4 : Gestion de valeurs nulles

Certaines valeurs de pixels étaient nulles (égales à 0) et ne m'intéressaient pas pour l'analyse. Cependant, après traitement, les deux couches se superposaient. Si un pixel de la couche luxmètre avait une valeur de 2 et que le même pixel dans la couche satellite avait également une valeur de 2, le résultat final aurait été 0, ce qui aurait rendu difficile la distinction entre les pixels initialement nuls et ceux ayant des valeurs égales.

Pour résoudre ce problème, j'ai créé une couche masque avec la calculatrice raster en utilisant la formule suivante : $(\text{couche luxmètre} = 0) \text{ and } (\text{couche satellite} = 0)$. Cette opération m'a donné un raster avec une seule bande allant de 0 à 1 où les pixels avaient la valeur 0 quand il y avait une valeur > 0 et 1 quand la valeur était nulle. J'ai ensuite converti ce raster en vecteur pour pouvoir supprimer toutes les valeurs nulles.

Étape 5 : Découpe et comparaison des rasters

J'ai utilisé la fonction de découpe de raster selon un masque en prenant comme couche principale mon raster en 8 bits et comme couche masque le vecteur découpé. Cela m'a permis d'obtenir un raster avec des valeurs uniquement positives.

Enfin, pour comparer les deux couches, j'ai utilisé la calculatrice raster avec la formule suivante : « couche luxmètre découpée avec le masque » - « couche satellite ». Cela m'a donné une couche avec des valeurs allant approximativement de -255 à 255. Les valeurs négatives indiquent que les valeurs de la couche satellite sont plus fortes, tandis que les valeurs positives indiquent le contraire.

Résultats

Analyse Préliminaire des Données et Importance des Traitements SIG

Une première interprétation visuelle a été réalisée pour évaluer la correspondance entre les données de luminosité relevées par le luxmètre et les bandes spectrales des images satellites. Cette étape initiale a permis de vérifier si les deux jeux de données se superposaient visuellement et si des décalages étaient présents par rapport à l'image satellite. Lors de cette analyse, nous avons examiné si une correction par géoréférencement était nécessaire pour aligner précisément les relevés de terrain avec les images satellitaires.

D'un point de vue visuel, les relevés de luminosité semblaient bien correspondre aux images satellites. Cette correspondance visuelle suggère que les deux jeux de données sont alignés de manière cohérente, ce qui permet déjà de tirer certaines interprétations préliminaires sur la distribution de la lumière dans les zones étudiées. Par exemple, les zones de forte luminosité relevées par le luxmètre coïncidaient avec les zones de haute intensité lumineuse sur les images satellites, et les variations de luminosité semblaient suivre des tendances similaires.

Cependant, même si une correspondance visuelle est observée, il est crucial de procéder à une superposition précise des données en utilisant des traitements de Systèmes d'Information Géographique (SIG) et des analyses mathématiques.

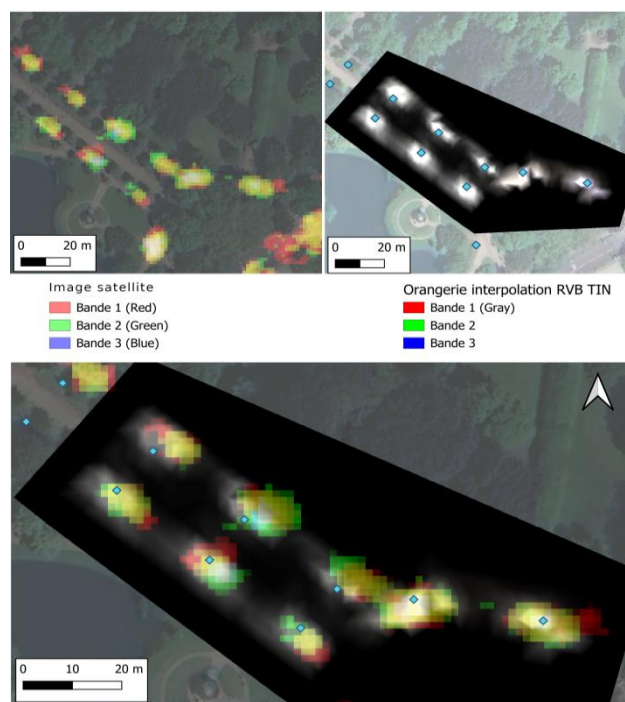


Figure 21 : Superposition de l'image satellite et de l'interpolation du parc de l'Orangerie
Source : Eurométropole de Starsbourg ; Image satellite
Auteur : Guillaume Yléann

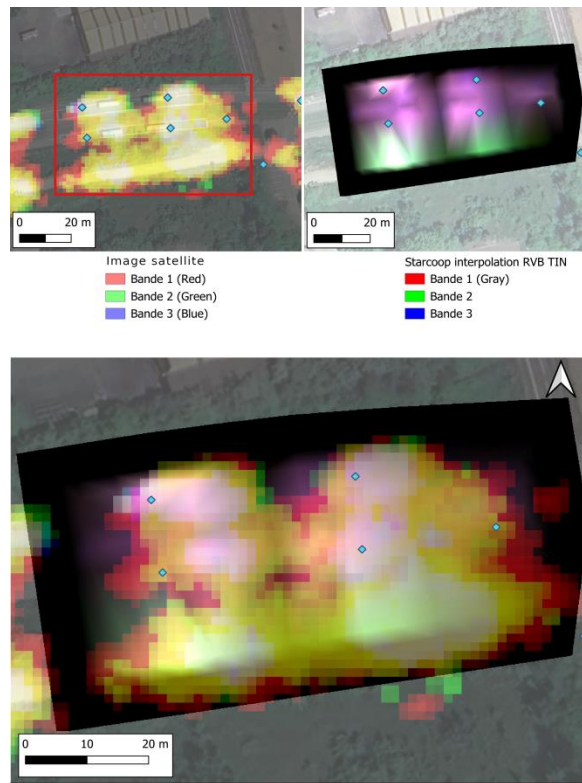


Figure 22 : Superposition de l'image satellite et de l'interpolation de la station de tram Starcoop
 Source : Eurométropole de Starsbourg ; Image satellite
 Auteur : Guillaume Yléann
 Fond de carte : Google Satellite ; Google Maps

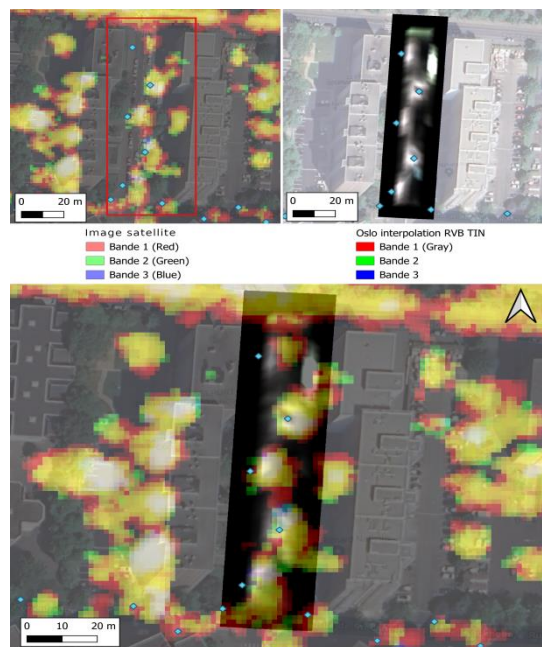


Figure 23 : Superposition de l'image satellite et de l'interpolation de la rue d'Oslo
 Source : Eurométropole de Starsbourg ; Image satellite
 Auteur : Guillaume Yléann
 Fond de carte : Google Satellite ; Google Maps

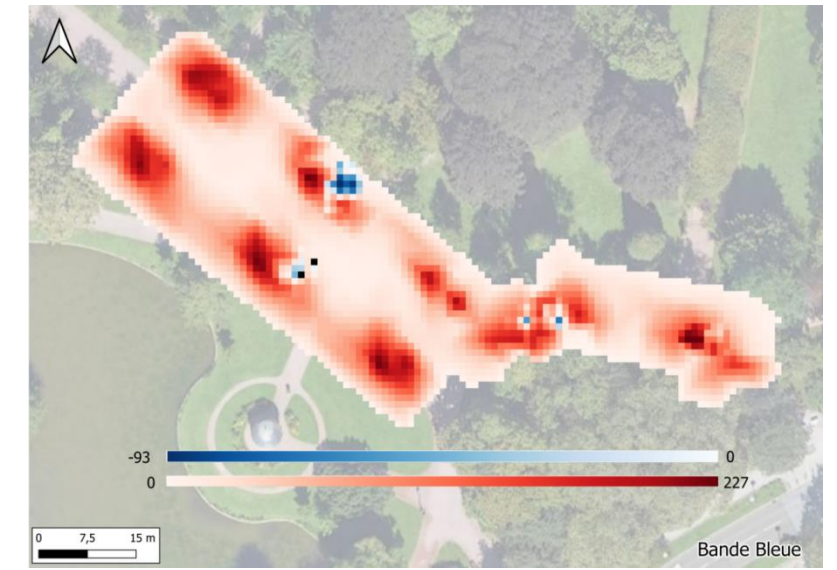
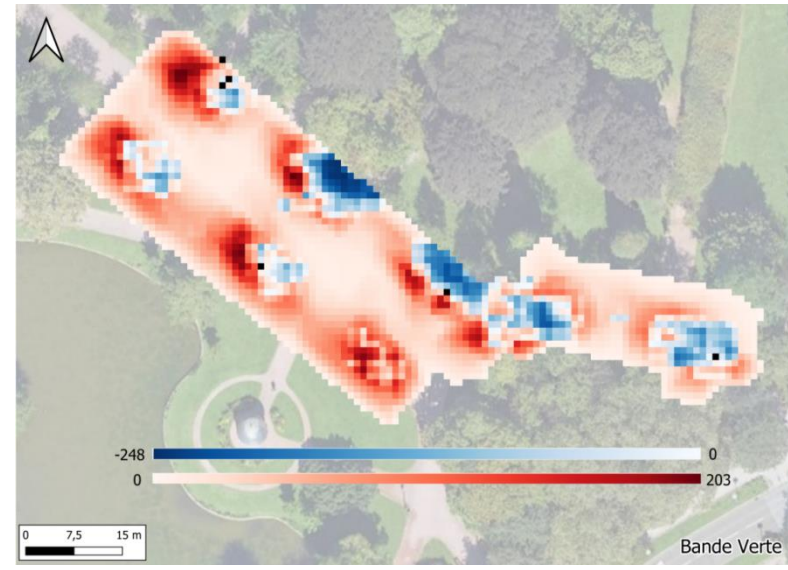
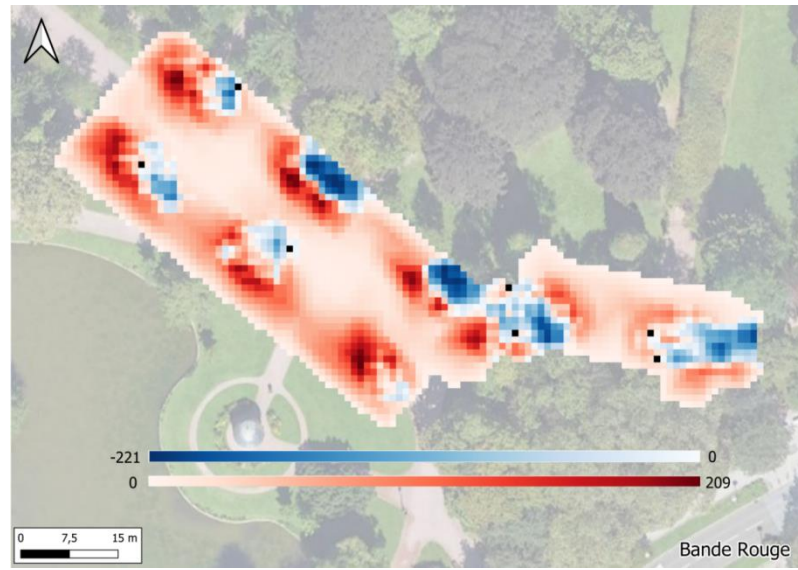
Site / Bande

Rouge

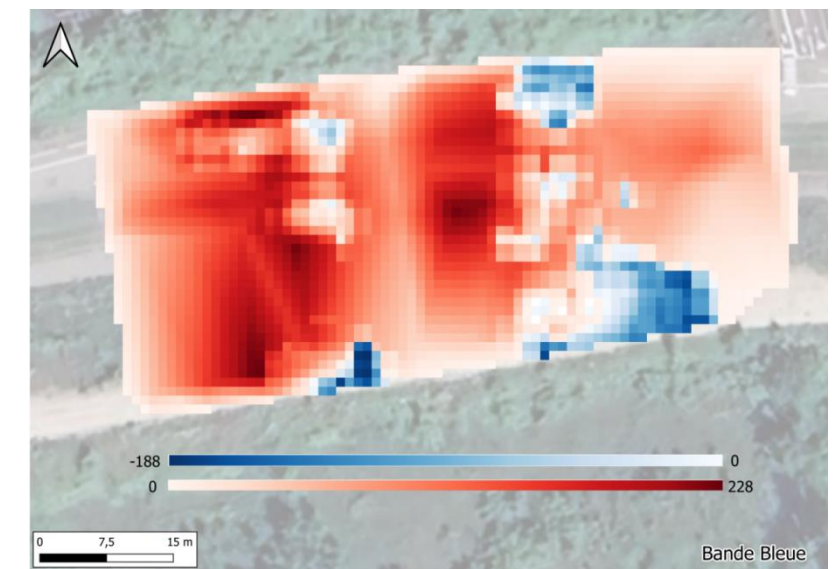
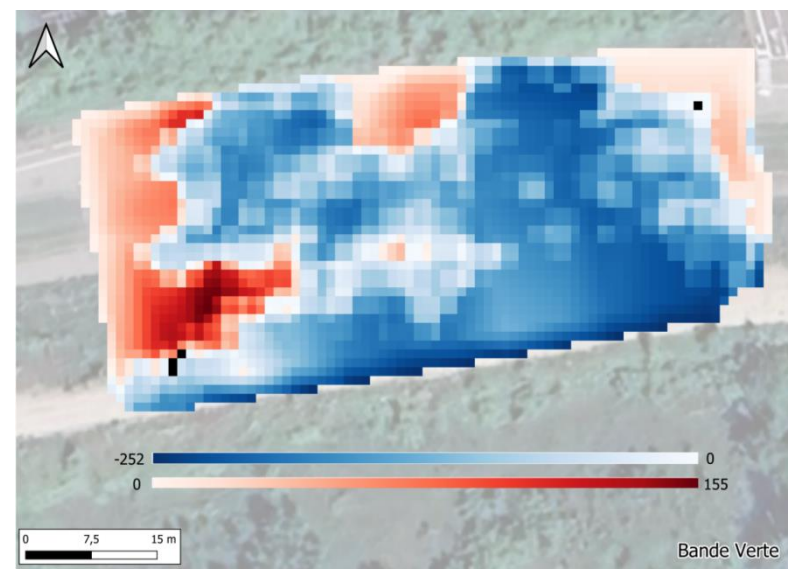
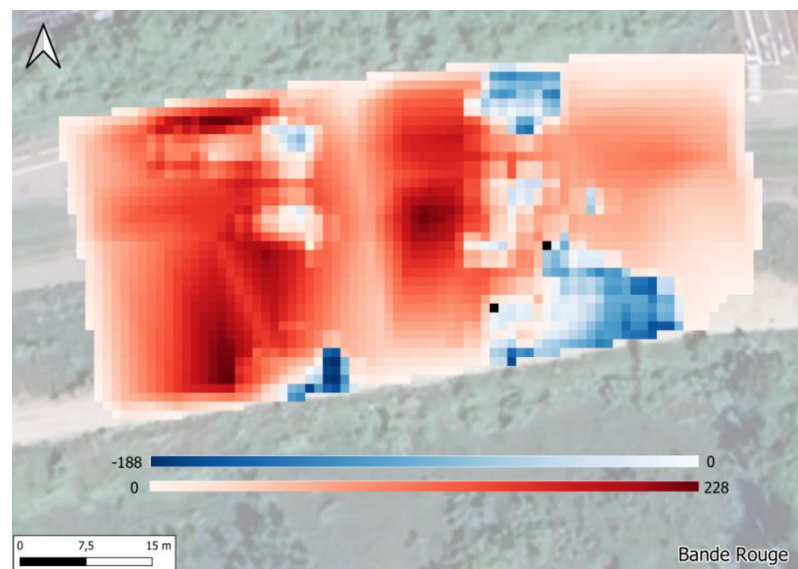
Vert

Bleue

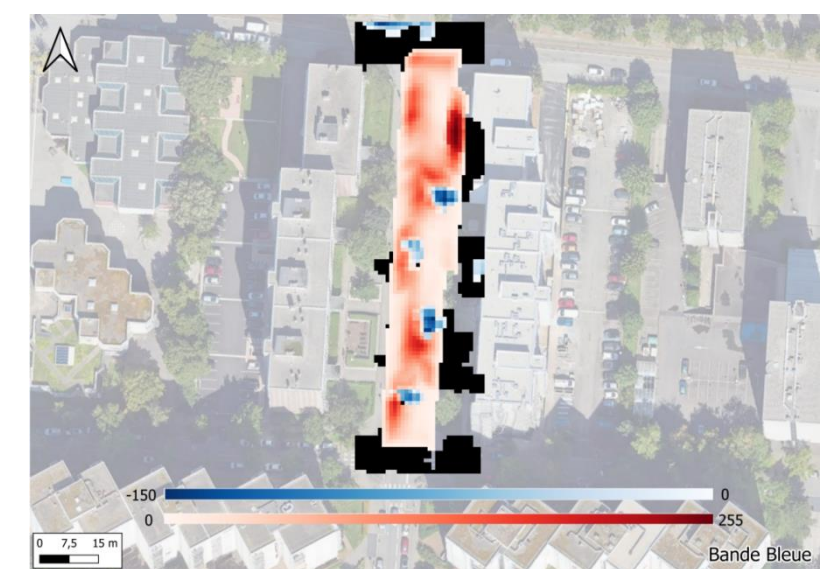
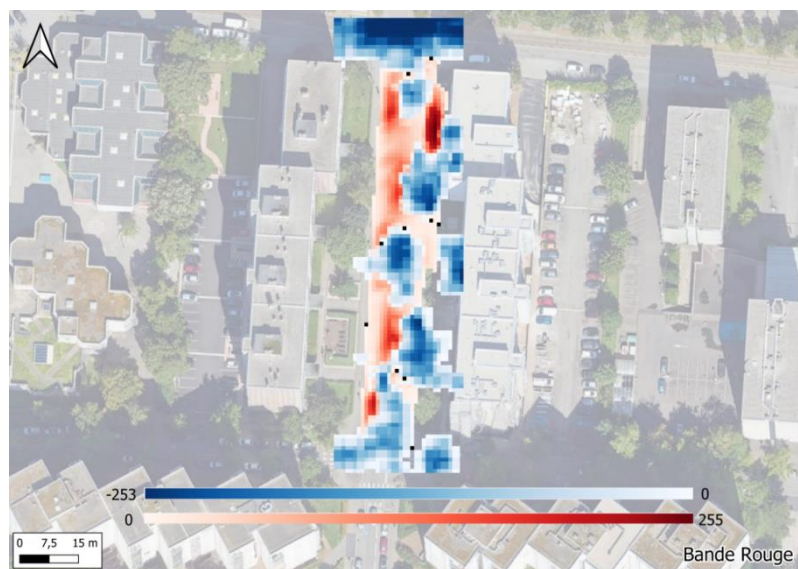
Orangerie



Starcoop



Oslo



Analyse de la Superposition des Données Satellitaires et des Relevés au Luxmètre

J'ai procédé à la superposition d'images satellites et de données de relevés au sol obtenues par un luxmètre, afin d'analyser les variations spectrales du territoire étudié. Les trois cartes résultantes correspondent chacune à une bande spectrale spécifique : bleu (460-520 nm), vert (510-580 nm), et rouge (630-690 nm). Pour comparer les deux couches de données (satellitaire et luxmètre), nous avons utilisé une calculatrice raster avec la formule suivante : « couche luxmètre découpée avec le masque » - « couche satellite ». Les valeurs obtenues varient approximativement de -255 à 255, représentées en pixels de 1m², où les couleurs indiquent les écarts entre les deux sources de données :

- Rouge : valeurs positives (luxmètre > satellite)
- Bleu : valeurs négatives (luxmètre < satellite)
- Noir : valeurs égales entre les deux couches.

Dominance de la Couleur Rouge

Dans la majorité des cartes, une grande partie du territoire apparaît en rouge. Cela indique que, pour la plupart des zones étudiées, les valeurs mesurées par le luxmètre sont supérieures à celles détectées par l'imagerie satellitaire. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette dominance rouge. Premièrement, le luxmètre étant un instrument de mesure local, est souvent plus sensible et précis pour capter les variations fines de l'intensité lumineuse au sol que les satellites, dont la résolution est plus grossière. Deuxièmement, certaines surfaces, telles que les toits clairs, les routes pavées ou les zones sableuses, peuvent réfléchir plus de lumière détectée par le luxmètre, apparaissant ainsi plus lumineuses. Troisièmement, les mesures satellitaires peuvent être influencées par des conditions atmosphériques comme la nébulosité, la pollution ou l'humidité, qui atténuent les signaux optiques reçus, contrairement aux mesures prises directement au sol.

Il est également important de noter que les images satellites utilisées ont été prises pendant la période de confinement due à l'épidémie de Covid-19, ce qui pourrait avoir affecté les conditions de lumière ambiante et, par conséquent, les mesures satellitaires. De plus, une partie de la lumière peut être obstruée par des éléments comme les arbres, les bâtiments ou d'autres structures. Enfin, les images satellites captent principalement la lumière émise vers le ciel, ce qui dépend aussi de l'angle de diffusion de la lumière.

Zones en Bleu

Les zones en bleu, bien que plus rares et précises, indiquent des endroits où les valeurs spectrales de l'image satellite sont supérieures à celles du luxmètre. Cette situation pourrait s'expliquer par la couverture végétale dense, où les satellites captent des réflexions des parties supérieures des arbres que le luxmètre au sol ne détecte pas aussi intensément. Il est aussi

possible que des anomalies instrumentales, comme des variations dans le calibrage ou des erreurs de mesure du luxmètre, expliquent certaines des valeurs inférieures.

Si la majorité des cartes montraient une dominance bleue, cela indiquerait que les mesures satellites sont généralement plus élevées que celles du luxmètre au sol. Cela pourrait être dû à la réflectance élevée à haute altitude, avec les satellites capturant une plus grande quantité de lumière réfléchi par des structures élevées ou des zones ouvertes. Les limitations des mesures au sol, influencées par des ombres, des obstacles ou des micro-variations non-déTECTABLES par des instruments aériens, peuvent également jouer un rôle.

Pixels Noirs

Les pixels noirs, représentant des valeurs égales entre les deux couches, sont relativement rares. Leur présence suggère des zones où les mesures satellitaires et luxmétriques sont en accord. Cela pourrait indiquer une homogénéité du terrain, avec des surfaces uniformes sans variations significatives de la réflectance, comme des parkings ou de grandes étendues d'eau. Un calibrage précis entre les deux méthodes de mesure pourrait également expliquer cette correspondance dans ces zones spécifiques.

Équilibre des Couleurs Rouge et Bleu

Si les deux couleurs étaient à peu près équilibrées, cela suggérerait une cohérence générale entre les deux méthodes de mesure, avec des variations locales dues à des facteurs spécifiques tels que l'hétérogénéité du terrain. Les zones variées en termes de composition et de réflectance de surface pourraient expliquer les différences locales. De plus, un bon étalonnage des instruments et des techniques de mesure précises à la fois au sol et par satellite contribueraient à cet équilibre.

Résultats Température de couleur (Kelvin) sur les différents sites

Site de l'Orangerie

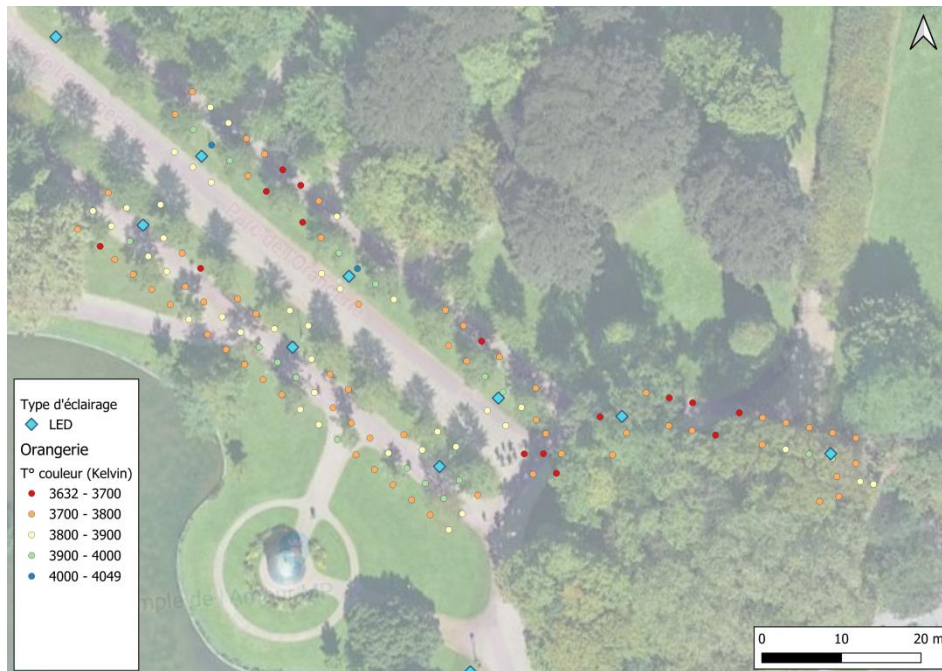


Figure 24 : Valeurs en Kelvin des points luxmètres du parc de l'Orangerie
Source : Eurométropole de Stasbourg

Auteur : Guillaume Yléann

Fond de carte : Google Satellite ; Google Maps

Distribution des températures de couleur :

La figure 24 révèle une gamme de températures de couleur allant de 3632K à 4049K, nettement supérieures à la température nominale de 3000K des lampadaires LED installés. Cette différence significative entre la spécification et la mesure sur le terrain est particulièrement intrigante.

Contrairement à ce qu'on pourrait attendre dans un environnement urbain, les mesures semblent relativement uniformes, avec une prédominance de points dans les gammes moyennes (3700K-3900K). Cela suggère une certaine cohérence dans l'éclairage du parc, malgré la présence de végétation qui pourrait potentiellement influencer la diffusion de la lumière.

Le fait que la zone étudiée se trouve au milieu d'un parc, avec peu d'interférences lumineuses externes, est crucial pour l'interprétation de ces données. L'absence relative de sources lumineuses concurrentes pourrait expliquer la cohérence des mesures, mais ne justifie pas l'écart entre la température de couleur nominale et mesurée.

L'écart important entre la température de couleur spécifiée (3000K) et les mesures (3632K-4049K) est particulièrement intrigant. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées :

- Vieillesse des LED : Les LED peuvent voir leur température de couleur augmenter avec le temps.
- Influence de l'environnement : La réflexion sur les surfaces environnantes (feuillage, sol) pourrait altérer la perception de la température de couleur.
- Précision du luxmètre : Il pourrait y avoir un biais systématique dans l'instrument de mesure.
- Spécifications inexactes : Les lampadaires installés pourraient ne pas correspondre exactement aux spécifications annoncées du fait que les données datent de 2020, il se peut que le type d'éclairage ait été remplacé.

La température de couleur plus élevée que prévue pourrait avoir des implications, une lumière plus froide que prévu pourrait potentiellement perturber les rythmes circadiens de la faune locale.

Bien que généralement uniforme, on observe quelques variations spatiales dans les températures de couleur. Les points bleus (4000K - 4049K) semblent légèrement plus fréquents dans certaines zones, ce qui pourrait indiquer des variations locales dans les conditions d'éclairage ou l'influence de facteurs environnementaux spécifiques.

Site de la station Starcoop



Figure 25 : Valeurs en Kelvin des points luxmètres du parc de la station de tram Starcoop

Source : Eurométropole de Starsbourg

Auteur : Guillaume Yléann

Fond de carte : Google Satellite ; Google Maps

La figure 25 révèle une variété de températures de couleur allant de 1844K à 3296K, réparties de manière non-uniforme sur la zone. Les lampadaires LED, indiqués par des marqueurs bleus en forme de losange, sont censés avoir une température de couleur de 3000K. Cependant, les mesures prises au luxmètre montrent une gamme plus large de températures, suggérant des influences environnementales ou des variations dans les mesures.

Cela pourrait être dû à plusieurs facteurs tels que la diffusion de la lumière ou les réflexions sur les surfaces environnantes. Les zones présentant les températures de couleur les plus basses (1844K - 2134K), indiquées en bleu foncé, correspondent à deux lampadaires situés sur des espaces privés. Ces sources de lumière produisent une lumière nettement plus chaude que les lampadaires LED publics. Sans informations sur ces lampadaires privés, on peut spéculer qu'ils utilisent peut-être un type d'éclairage différent, comme des lampes à sodium ou des LED à très basse température de couleur.

On observe un gradient de température de couleur allant généralement du plus chaud (rouge) au plus froid (bleu). Cette progression pourrait indiquer une interaction complexe entre différentes sources de lumière, y compris la réflexion et la diffusion de la lumière sur diverses surfaces urbaines.

Site de la rue d'Oslo :



Figure 26 : Valeurs en Kelvin des points luxmètres de la rue d'Oslo

Source : Eurométropole de Starsbourg

Auteur : Guillaume Yléann

Fond de carte : Google Satellite ; Google Maps

Mesures et Variations de Températures de Couleurs

L'analyse des données recueillies à l'aide du luxmètre révèle des variations notables des températures de couleur en fonction des points de mesure, malgré la constance supposée des sources lumineuses principales. Les lampadaires LED, d'une hauteur de 3,5m, d'une puissance de 50W et d'une température de couleur de 3000K, montrent des valeurs de température variant entre 2800K et 4000K. Les points de mesure situés au nord de la zone d'étude affichent des températures de couleur plus basses, généralement entre 2800K et 2900K, en raison de la proximité des lampadaires au sodium haute pression (SHP), qui ont une température de couleur de 2200K. En revanche les points au sud, éclairés exclusivement par des lampadaires LED, montrent des températures de couleur plus élevées, allant de 3500K à 4000K.

Influence des Sources Lumineuses

Les écarts observés peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs. Premièrement, la présence de sources lumineuses secondaires (telles que les lumières privées des habitations et des bâtiments, ainsi que les éclairages automatiques) influence fortement les relevés. Ces sources, bien qu'elles ne soient pas les principales étudiées, contribuent à la pollution lumineuse ambiante et modifient la température de couleur perçue. Les lampadaires SHP de la rue adjacente, bien qu'à une certaine distance, ont un effet sur les relevés au nord, abaissant la température de couleur mesurée.

Facteurs Contextuels

Les facteurs contextuels, tels que les ombres projetées par des voitures garées, des structures ou des arbres, ainsi que la réflectance de surfaces métalliques ou brillantes, introduisent des variations dans les mesures. Par exemple, une voiture garée sous un lampadaire LED peut refléter la lumière et augmenter la température de couleur perçue. De même, les lumières passagères, comme les phares de voitures, les tramways ou les vélos, ajoutent une complexité aux mesures instantanées, créant des pics de température de couleur qui ne sont pas représentatifs de l'éclairage permanent.

Comparaison Nord-Sud

La carte réalisée (figure 26) montre une tendance claire : les points au nord, proches des lampadaires SHP, ont une température de couleur plus faible. Cela peut être attribué à la nature de la lumière des lampadaires SHP, qui est plus chaude (2200K). Par contraste, les points au sud, où l'éclairage est exclusivement assuré par des lampadaires LED, présentent des températures de couleur plus élevées (jusqu'à 4000K). Cela s'explique par la qualité intrinsèque des LED et les possibles contributions d'autres sources lumineuses, qui augmentent la température de couleur mesurée.

Calibration et Fiabilité des Mesures

Le calibrage de l'appareil de mesure est essentiel pour assurer la fiabilité des relevés. Des variations dans le calibrage peuvent introduire des erreurs systématiques, affectant ainsi la précision des températures de couleur relevées. Il est crucial de vérifier régulièrement l'étalonnage du luxmètre pour minimiser ces erreurs. De plus, la méthode de prise de mesure doit être standardisée pour éviter les biais introduits par des changements dans l'angle de mesure ou la distance aux sources lumineuses.

De XYZ à RVB : Techniques de Normalisation pour QGIS

Étape 1 : Conversion des couleurs XYZ en RVB

Conversion de XYZ en linéaire RVB

XYZ et RVB sont deux systèmes de représentation des couleurs. XYZ est souvent utilisé en sciences de la couleur, tandis que RVB est couramment utilisé pour les écrans et les images numériques. Il a été nécessaire de convertir les valeurs XYZ en une version initiale des valeurs RVB, appelée RVB linéaire. Pour cela j'ai utilisé une "matrice de transformation", qui est un tableau de nombres permettant de convertir une couleur d'un système à un autre⁷ :

$$\begin{bmatrix} R_{\text{linéaire}} \\ G_{\text{linéaire}} \\ B_{\text{linéaire}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +3.2406 & -1.5372 & -0.4986 \\ -0.9689 & +1.8758 & +0.0415 \\ +0.0557 & -0.2040 & +1.0570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{D65} \\ Y_{D65} \\ Z_{D65} \end{bmatrix}$$

Pour obtenir les valeurs RVB linéaires, j'ai multiplié mes valeurs XYZ grâce à ce tableau de nombres.

Conversion de RVB linéaire en RVB gamma-corrigé

Ensuite, il a fallu ajuster ces valeurs RVB linéaires pour qu'elles correspondent mieux à la façon dont nos yeux perçoivent les couleurs. Ce processus s'appelle la "correction gamma". La correction gamma transforme les valeurs pour qu'elles aient l'air plus naturel lorsqu'elles sont affichées sur un écran :

$$C_{\text{sRGB}} = \begin{cases} 12.92C_{\text{linéaire}}, & C_{\text{linéaire}} \leq 0.0031308 \\ 1.055(C_{\text{linéaire}}^{1/2.4}) - 0.055, & C_{\text{linéaire}} > 0.0031308 \end{cases}$$

Cela signifie que si la valeur RVB linéaire est très petite, il a été nécessaire que je la multiplie par 12.92. Sinon, je l'ai transformée en utilisant une puissance et une multiplication pour obtenir une valeur corrigée.

Normalisation des valeurs

Après avoir appliqué la correction gamma, certaines valeurs peuvent dépasser les limites normales de 0 à 1. Pour s'assurer que les valeurs RVB sont valides, j'ai "normalisé" ces valeurs, ce qui signifie que j'ai fixé les valeurs en dehors de cette plage à 0 ou 1. Exemple : si une valeur est inférieure à 0, je dois la fixer à 0. Si elle est supérieure à 1, je dois la fixer à 1 :

⁷ <https://www.oceanopticsbook.info/view/photometry-and-visibility/from-xyz-to-rgb>

« $R = \max(0, \min(1, R))$ »

J'ai fait la même chose pour (V) et (B).

Conversion en valeurs entières

Pour que ces valeurs soient utilisables par les ordinateurs et les écrans, il a fallu que je les convertisse en nombres entiers entre 0 et 255. Les écrans utilisent cette plage de valeurs pour afficher les couleurs. J'ai fait cela en multipliant chaque valeur par 255 :

« $R_{int} = R * 255$ »

J'ai fait de même pour (V) et (B).

Étape 2 : Implémentation dans Excel

Conversion de XYZ en RVB linéaire dans Excel

Pour effectuer ces calculs dans Excel, j'ai utilisé des formules dans les cellules. Par exemple, pour calculer R_{lin} , j'ai écrit :

« $= 3.2406 * X - 1.5372 * Y - 0.4986 * Z$ »

Cette formule prend les valeurs XYZ et les transforme en une première version de la valeur R.

Correction gamma dans Excel

Ensuite, j'ai ajouté une formule pour ajuster cette valeur avec la correction gamma. Pour R, j'ai utilisé :

« $= IF(R_{lin} \leq 0.0031308, 12.92 * R_{lin}, 1.055 * (R_{lin}^{(1 / 2.4)} - 0.055))$ »

Cette formule vérifie si la valeur est petite et applique la transformation appropriée.

Normalisation des valeurs dans Excel

Je me suis ensuite assuré que les valeurs étaient dans les limites correctes :

« $= MAX(0, MIN(1, R))$ »

Cela garantit que les valeurs ne sortent pas des limites de 0 à 1.

Conversion en valeurs entières dans Excel

Enfin, j'ai converti ces valeurs en nombres entiers :

« = *R_clipped* * 255 »

J'ai fait de même pour (G) et (B), obtenant ainsi les valeurs finales prêtes à être utilisées.

Conversion des valeurs RVB en hexadécimal

Les couleurs RVB sont représentées par trois nombres, chacun correspondant à l'intensité du rouge (R), du vert (G), et du bleu (B). Chaque valeur peut aller de 0 à 255. Par exemple, une couleur RVB pourrait être (255, 0, 0) pour le rouge pur.

Pour convertir une couleur RVB en format hexadécimal (utilisé en HTML), j'ai dû transformer chaque valeur (rouge, vert, bleu) en son équivalent hexadécimal. Le système hexadécimal utilise des chiffres de 0 à 9 et des lettres de A à F pour représenter des valeurs de 0 à 15 (voir l'exemple de l'annexe 10).

Pour convertir 255 en hexadécimal, j'ai utilisé un code VBA qui a converti les valeurs RVB en une couleur HTML,. J'ai commencé par rentrer le code macro suivant :

```
« Function RGBToHTML(R As Integer, G As Integer, B As Integer) As String
  RGBToHTML = "#" & Right("0" & Hex(R), 2) & Right("0" & Hex(G), 2) & Right("0" & Hex(B), 2)
End Function »
```

Puis dans la cellule **xxx2**, j'ai entré la formule suivante :

« =*RGBToHTML*(xxx2, xxx2, xxx2) »

Pour utiliser ces couleurs dans QGIS, j'ai ajouté ces codes couleur à ma couche de données. J'ai pu modifier les propriétés de symbologie dans QGIS pour utiliser ces couleurs hexadécimales pour la visualisation.



Figure 27 : Couleur RVB des points luxmètres de la rue d'Oslo

Auteur : Guillaume Yléann

Fond de carte : Google Satellite ; Google Maps

Étape 3 : Revalorisation des couleurs

Quand j'ai remarqué que les différences de couleurs entre mes points dans QGIS étaient trop faibles, j'ai décidé de normaliser et de revaloriser les valeurs de couleur pour les rendre plus distinctes. La normalisation min-max est une méthode que j'ai utilisée pour transformer les valeurs afin qu'elles se situent entre 0 et 1. Cela m'a aidé à comparer les valeurs de couleur plus facilement.

Appliquer la formule de normalisation

Pour chaque valeur de couleur dans ma colonne M d'Excel, j'ai utilisé une formule pour normaliser les valeurs :

- J'ai commencé par soustraire la valeur minimale de ma colonne M de chaque valeur. Par exemple, si M2 est la valeur de ma cellule, la formule devient $(M2 - \text{MIN}(M:M))$.
- Ensuite, j'ai divisé ce résultat par la plage des valeurs de la colonne M, ce qui est $(\text{MAX}(M:M) - \text{MIN}(M:M))$.

Soit : « $= (M2 - \text{MIN}(M:M)) / (\text{MAX}(M:M) - \text{MIN}(M:M))$ »

Cela m'a permis de convertir chaque valeur de couleur en une valeur comprise entre 0 et 1.

Revaloriser les valeurs normalisées

Une fois que j'ai normalisé les valeurs de couleur, il a fallu les revaloriser pour les rendre utilisables comme valeurs RVB. Pour cela, j'ai multiplié chaque valeur normalisée par 255, ce qui les a transformées en valeurs dans la plage de 0 à 255. J'ai fait cela en utilisant la formule suivante dans Excel :

« $= S2 * 255$ »

Où S2 est la cellule contenant la valeur normalisée. Cela m'a donné des valeurs RVB prêtes à être utilisées.

Avec mes nouvelles valeurs RVB revalorisées j'ai recommencé une conversion en #HTML afin de colorer mes points dans QGIS de manière plus distincte.

En normalisant les valeurs de couleur, j'ai assuré une redistribution uniforme des couleurs sur toute la plage possible (0-255). Cela signifie que même les petites différences de valeurs dans mes données d'origine se sont traduites par des différences de couleur plus visibles. En conséquence, mes points dans QGIS ont des couleurs plus distinctes, ce qui rend les variations plus faciles à observer.

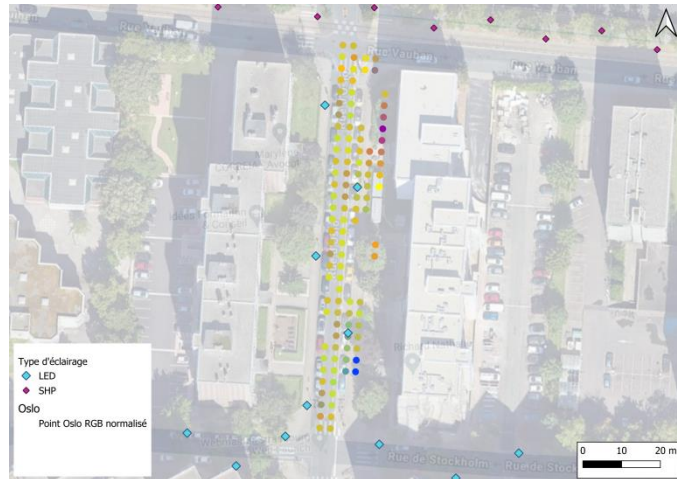


Figure 28 : Couleur RVB normalisé des points luxmètres de la rue d'Oslo

Source : Eurométropole de Starsbourg

Auteur : Guillaume Yléann

Fond de carte : Google Satellite ; Google Maps

Observations

Avant la normalisation et la revalorisation des couleurs, la faible différence de couleur entre les points rendait difficile l'interprétation des résultats. Les variations subtiles d'intensité lumineuse n'étaient pas suffisamment marquées, ce qui compliquait la visualisation des différences de pollution lumineuse. Grâce à la normalisation et à la revalorisation des couleurs, j'ai pu mieux visualiser les variations d'intensité lumineuse, ce qui a facilité l'analyse. Toutefois, il est important de garder à l'esprit que ces techniques modifient les données brutes, et l'interprétation des résultats doit en tenir compte.

La distribution des couleurs sur la carte semble corrélée avec la disposition des sources de lumière artificielle telles que les lampadaires.

Les cartes que j'ai réalisées (Figures 28 ;29 ;30) mettent en évidence que les valeurs RVB sont influencées par plusieurs facteurs environnementaux et structurels. Les bâtiments et la végétation peuvent également jouer un rôle important dans la répartition de la lumière pouvant bloquer ou réfléchir la lumière, modifiant ainsi la luminosité locale. Par exemple, si les points bleus sont situés près de grands bâtiments ou dans des zones ombragées par la végétation, cela pourrait expliquer les niveaux de lumière plus faibles. En revanche, des zones dégagées ou avec moins de végétation pourraient montrer des valeurs de lumière plus élevées, ce qui explique les points plus rouges/violet.

Les différences de couleur montrent que la pollution lumineuse n'est pas uniformément répartie, ce qui est important pour comprendre comment la lumière se propage et est bloquée ou absorbée dans un environnement urbain. Cette variabilité est cruciale pour identifier les zones nécessitant des ajustements dans l'éclairage public.

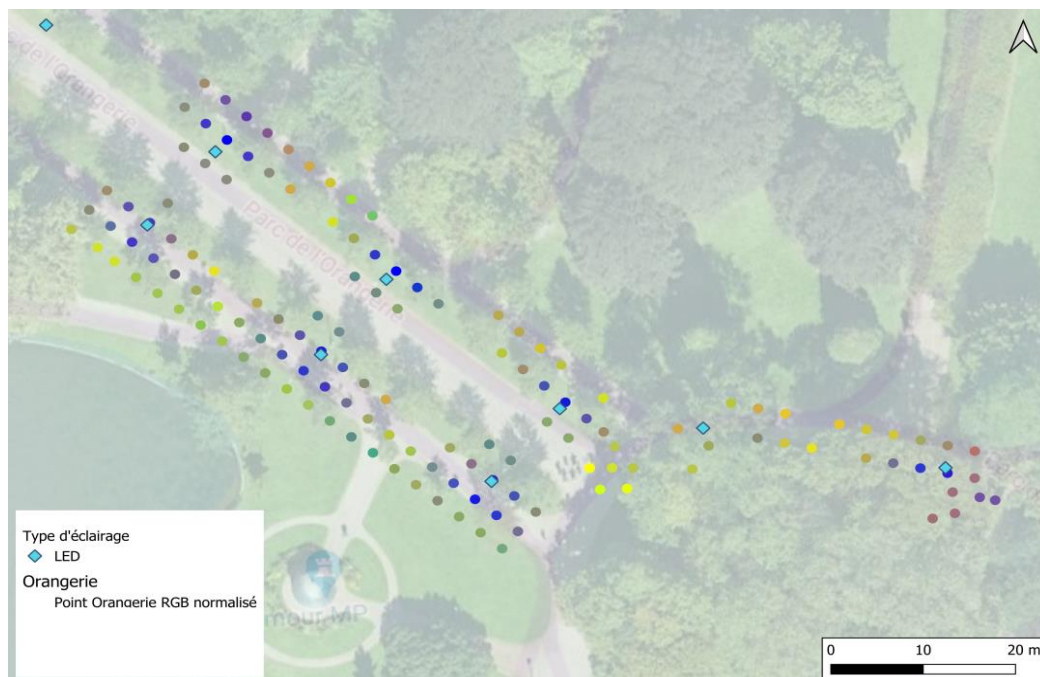


Figure 29 : Couleur RVB normalisé des points luxmètres du parc de l'Orangerie
 Source : Eurométropole de Starsbourg

Auteur : Guillaume Yléann

Fond de carte : Google Satellite ; Google Maps

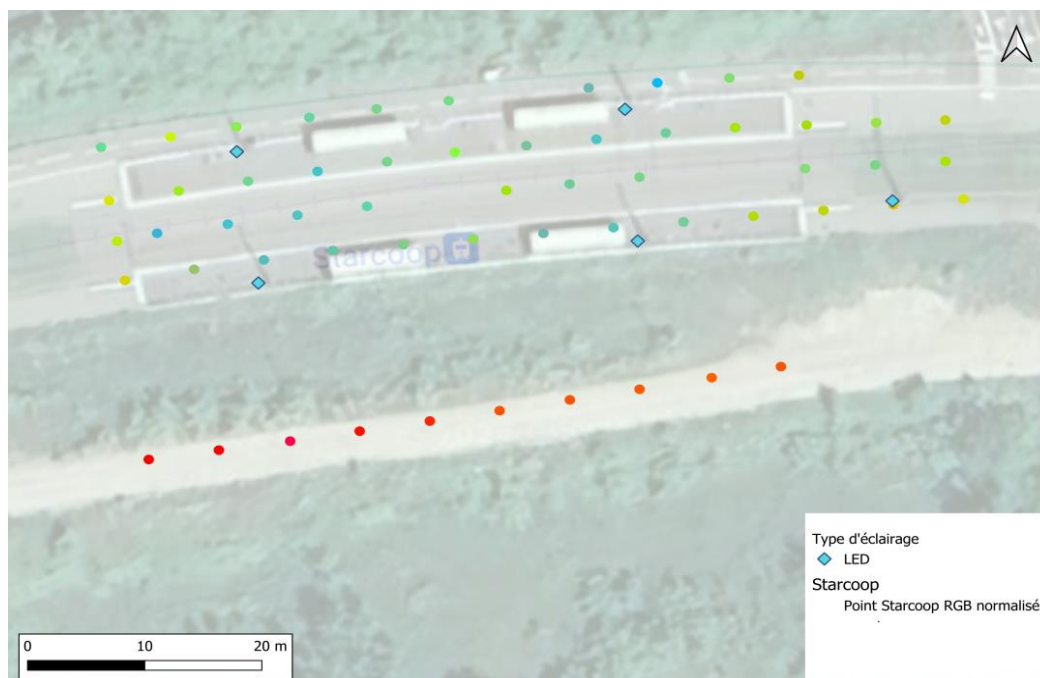


Figure 30 : Couleur RVB normalisé des points luxmètres de la station de tram Starcoop
 Source : Eurométropole de Starsbourg

Auteur : Guillaume Yléann

Fond de carte : Google Satellite ; Google Maps

Discussions

Les images satellites de la pollution lumineuse nocturne laissent souvent penser qu'il y a peu de lumière bleue dans l'environnement urbain. Cette apparente faible présence de lumière bleue pourrait être interprétée comme ayant un impact minimal sur l'écosystème nocturne et la santé humaine. Cependant, cette interprétation est souvent erronée, principalement en raison de l'interaction complexe entre la lumière bleue et l'atmosphère terrestre. La lumière bleue, ayant une courte longueur d'onde, est fortement dispersée par les molécules d'air et les particules en suspension. Ce phénomène, connu sous le nom de diffusion de Rayleigh, fait que la lumière bleue se disperse beaucoup plus que les autres longueurs d'onde lorsqu'elle traverse l'atmosphère. En conséquence, les satellites, situés en orbite et capturant des images depuis l'espace, détectent souvent moins de lumière bleue que ce qui est réellement présent au niveau du sol, réduisant ainsi l'intensité apparente de la lumière bleue dans les images satellites.

Les mesures de terrain, effectuées à l'aide de luxmètres et d'autres instruments photométriques, fournissent des données spécifiques sur l'illumination au niveau du sol. Par exemple, les relevés réalisés directement dans les rues de Strasbourg à l'aide de luxmètres-chromamètres permettent d'obtenir des données précises sur l'intensité et la longueur d'onde de la lumière émise par les sources lumineuses urbaines. Ces mesures au sol révèlent souvent une présence significative de lumière bleue, particulièrement émise par les lampadaires LED modernes. Grâce à ces données, il a été possible de réaliser des interpolations spatiales pour estimer la distribution de la lumière bleue dans des zones non mesurées directement. Les résultats ont montré généralement une différence notable avec les images satellites, démontrant une plus grande proportion de lumière bleue que ce que les images initiales suggèrent.

Une approche combinée, utilisant à la fois des données satellitaires et des mesures de terrain, offre la meilleure stratégie pour comprendre et atténuer les impacts de la pollution lumineuse. Par exemple, les données satellitaires peuvent être utilisées pour identifier les zones de forte pollution lumineuse, tandis que les relevés de terrain peuvent fournir des détails sur les conditions locales et les impacts écologiques directs. Les mesures de terrain permettent également d'évaluer directement les variations locales de la pollution lumineuse et de capturer les effets des réflexions sur les surfaces environnantes, ainsi que les influences des sources lumineuses secondaires. Cependant, ni les images satellites ni les relevés au sol ne suffisent à eux seuls. Les satellites peuvent manquer des détails au niveau du sol, tandis que les relevés au luxmètre sont limités dans leur couverture spatiale et temporelle. Cette approche combinée permet une évaluation plus précise de l'exposition des espèces à la pollution lumineuse.

Pour maximiser l'efficacité de cette approche combinée, il est nécessaire de développer des protocoles standardisés pour les mesures de la pollution lumineuse. Ces protocoles devraient inclure des méthodes de modélisation et d'intégration des données satellitaires et de terrain, permettant une évaluation cohérente et précise. La normalisation des valeurs mesurées pourrait être réalisée à l'aide de techniques comme la correction gamma et la conversion en valeurs RVB, facilitant ainsi la comparaison des données. Le développement d'un protocole de mesure standardisé est essentiel pour garantir la cohérence et la comparabilité des données. Ce protocole devrait inclure des directives sur la fréquence et la distribution des points de mesure au sol, ainsi que des méthodes spécifiques pour la collecte et le traitement des données. Les mesures de terrain doivent être effectuées à différents moments de la nuit et dans diverses conditions météorologiques pour capturer une gamme complète de variations.

Une étude dédiée à l'albédo, ou le pouvoir réfléchissant d'une surface, permettrait de compléter ces mesures en fournissant des informations sur la manière dont la lumière est réfléchi et diffusée par diverses surfaces. Les surfaces avec un albédo élevé, comme les routes claires ou les bâtiments peints en blanc, réfléchissent une plus grande partie de la lumière incidente, augmentant ainsi la dispersion lumineuse. En revanche, les surfaces avec un albédo faible, comme les véhicules ou la végétation dense, absorbent plus de lumière, réduisant la réflexion. Cette variabilité de l'albédo est un facteur déterminant dans l'étude de la pollution lumineuse. L'une des principales difficultés dans l'étude de l'albédo réside dans la résolution spatiale des données. Les mesures de l'albédo sont effectuées à l'échelle de dizaines de mètres carrés par pixel, tandis que les données de luxmètres sont mesurées sur des surfaces d'un mètre carré, de même des images satellites, qui offrent une résolution plus fine que les mesures d'albédo. Cette différence de résolution complique l'intégration des données d'albédo avec celles provenant des luxmètres et des satellites.

Pour approfondir la compréhension des impacts de la pollution lumineuse, des études futures devraient se concentrer sur plusieurs axes. Premièrement, il est important de mener des recherches sur les effets spécifiques de différentes longueurs d'onde de la lumière sur divers groupes d'animaux nocturnes. Cela permettrait de concevoir des systèmes d'éclairage qui minimisent les perturbations écologiques tout en répondant aux besoins humains. L'application de technologies émergentes, telles que les drones et l'intelligence artificielle, pourrait améliorer la résolution spatiale et temporelle des mesures de terrain. Ces technologies offrent la possibilité de collecter des données dans des zones difficilement accessibles et de fournir des relevés plus détaillés. Des études supplémentaires pourraient également se concentrer sur le développement de modèles prédictifs pour estimer les impacts écologiques de la pollution lumineuse en intégrant des données de diverses sources. La comparaison entre les données satellites et les relevés au sol permettrait de valider et calibrer les modèles de pollution lumineuse basés sur les images satellites, améliorant ainsi la précision des futures évaluations à grande échelle.

Il serait important de prendre en compte les limitations actuelles, comme la résolution spatiale des images et la fréquence des relevés au sol, et de continuer à améliorer les méthodologies. Par exemple, des améliorations futures pourraient inclure l'utilisation de drones pour des relevés plus fréquents ou des capteurs au sol permanents pour un suivi continu. L'étude de l'albédo, malgré les défis techniques, reste indispensable pour compléter les données existantes et fournir une évaluation plus complète de l'impact de la pollution lumineuse sur les écosystèmes nocturnes.

Les résultats de cette étude montrent que la pollution lumineuse en zone urbaine est le résultat d'un ensemble complexe de facteurs. Les sources lumineuses principales (lampadaires LED et SHP) jouent un rôle crucial, mais les sources secondaires et les conditions contextuelles modifient significativement les températures de couleur enregistrées et perçues. Ces variations doivent être prises en compte lors de l'élaboration de politiques d'éclairage urbain visant à réduire la pollution lumineuse. Une meilleure gestion de l'éclairage public, devrait tenir en compte des interactions entre différentes sources lumineuses et de la diversité des contextes urbains variés, afin de créer des environnements nocturnes plus uniformes et moins pollués par la lumière artificielle.

Enfin, il serait intéressant d'intégrer les méthodes de mesure de la pollution lumineuse développées pour les milieux urbains aux zones rurales, qui sont également impactées par cette pollution, bien que de manière différente. Dans les zones non urbaines, telles que les régions montagneuses ou champêtres où la pollution lumineuse est plus diffuse et les îlots urbains sont espacés, il est probable que la méthode combinée de mesure de la pollution lumineuse présente certaines limites. On pourrait supposer que l'une des principales difficultés résiderait dans la couverture spatiale des mesures au sol. Dans ces environnements, il est possible que les relevés au luxmètre nécessitent un maillage plus dense et plus étendu pour capturer les variations locales, ce qui les rendrait probablement plus longs et fastidieux à réaliser. La faible densité des sources lumineuses et leur distribution inégale pourraient également compliquer la modélisation et l'interpolation des données, rendant peut-être difficile une estimation précise de la pollution lumineuse sur de vastes territoires.

De plus, l'interaction de la lumière avec le paysage naturel, comme les montagnes ou les forêts, pourrait introduire des variables supplémentaires telles que l'ombrage ou la réflexion spécifique aux matériaux naturels, qui ne seraient pas toujours bien capturées par les relevés standards. Il est aussi envisageable que les satellites, malgré leur capacité à fournir une vue d'ensemble, soient moins efficaces dans ces zones pour distinguer les faibles niveaux de lumière artificielle du bruit de fond naturel.

Dans ces contextes non urbains, il serait nécessaire d'imaginer des adaptations des méthodologies actuelles. Par exemple, on pourrait envisager de combiner des relevés de terrain avec des technologies (drones, aéronef ultraléger (ULM), Avions Télécommandés (RC), Ballons Captifs, ...) pour augmenter la couverture et la précision des données, ou d'intégrer des modèles prédictifs spécifiques aux environnements naturels pour mieux comprendre et atténuer les impacts de la pollution lumineuse dans ces zones sensibles.

Bien que les méthodes de mesure de la pollution lumineuse développées pour les milieux urbains présentent des limites lorsqu'elles sont appliquées aux zones rurales, c'est précisément dans ces environnements que réside un grand nombre d'espèces nocturnes. Ces milieux abritent une biodiversité riche et souvent fragile, où les impacts de la pollution lumineuse peuvent être particulièrement néfastes. Ainsi, les principaux enjeux en matière de protection des écosystèmes nocturnes se trouvent peut-être dans ces zones rurales, rendant d'autant plus crucial le développement de méthodologies adaptées pour évaluer et atténuer la pollution lumineuse dans ces environnements.

Conclusion :

L'approche utilisée, combinant des relevés spatialisés au sol avec un luxmètre-chromamètre et l'analyse des images satellites Jilin, a permis d'établir une cartographie de l'éclairage urbain strasbourgeois et de sa diffusion spatiale. L'analyse comparative des données spectrales obtenues par interpolation des mesures au sol et des images satellites semble prometteuse pour la caractérisation de l'éclairage urbain, offrant des perspectives intéressantes pour l'étude de l'environnement lumineux nocturne.

Les résultats démontrent une bonne corrélation entre les méthodes d'acquisition de données, validant ainsi l'utilité des images satellites pour compléter les mesures de terrain. Ces résultats paraissent particulièrement pertinents dans le contexte des politiques d'aménagement de l'éclairage public de l'Eurométropole, en offrant potentiellement un outil supplémentaire pour évaluer l'impact des nouveaux lampadaires LED installés dans plusieurs quartiers pilotes de Strasbourg.

Bien que je trouve cette approche prometteuse, je suis conscient qu'elle présente certaines limites. Je pense que la précision de l'interpolation doit être rigoureusement validée par des mesures de terrain supplémentaires. De plus, il faut souligner que les conditions atmosphériques et les variations saisonnières peuvent influencer les résultats, ce qui nécessiterait une étude sur le long terme pour établir des modèles robustes et valider les résultats obtenus.

Les perspectives d'avenir de l'approche proposée pourraient inclure l'intégration de cette méthodologie dans des systèmes de gestion intelligente de l'éclairage urbain, permettant une adaptation en temps réel de l'éclairage en fonction des besoins urbains et des considérations environnementales. En outre, la création d'un référentiel comparatif des perceptions de l'éclairage urbain par les habitants pourrait permettre d'enrichir les politiques publiques en matière de gestion de la lumière en milieu urbain.

La poursuite de ces recherches serait importante pour développer des solutions durables qui intègrent à la fois les avancées technologiques et les impératifs écologiques, contribuant ainsi à un développement urbain respectueux de l'environnement.

Annexe 1

Satellite Jilin

Le Jilin-1 est le premier système de satellites d'observation de la Terre à usage commercial développé par la Chine. Ces satellites sont opérés par la société Chang Guang Satellite Technology Corporation. Le premier groupe de satellites a été lancé par Long March 2D depuis le Centre de lancement de satellites de Jiuquan le 7 octobre 2015.

En 2023, la constellation comptait 30 satellites et devrait être étendue à 138 satellites pour offrir des images haute résolution. D'ici fin 2025, la constellation complète de 138 satellites sera en orbite, permettant une acquisition de données continue, par tous les temps et sur tout le spectre, capable de fournir des produits et services d'information géospatiale avec la plus haute résolution temporelle et spatiale au monde.

La série de satellites Jilin-1 comprend huit « Jilin-1 Smart Video Satellites ». Ces satellites fournissent des images vidéo couleur en haute définition (HD) 4K depuis une orbite héliosynchrone⁸ (SSO) avec un temps de revisite (période orbitale) de 3,3 jours et une durée de vie du système de cinq ans.

Le satellite Jilin-1 07B, a été lancé le 19 janvier 2018 et est spécialisé dans la caractérisation des nuisances lumineuses. Ce satellite offre des images panchromatiques, multispectrales et dans le proche infrarouge, permettant de distinguer clairement les différentes sources lumineuses nocturnes.

Auparavant, l'achat de ces images se faisait directement auprès de la société chinoise, mais désormais, des entreprises telles que laTeleScop et Geo4i se chargent de leur commercialisation en France. Lorsque ces images sont achetées, elles sont livrées au format brut sans orthorectification, c'est-à-dire sans correction géométrique pour les rendre superposables à une carte plane.

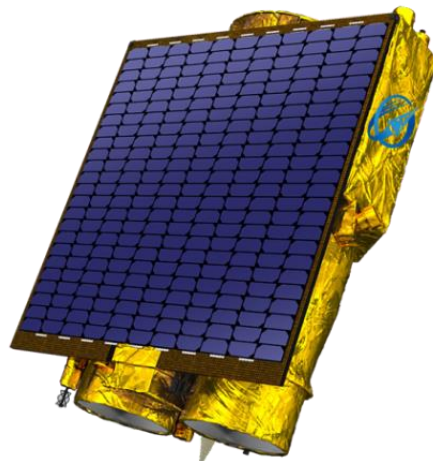


Figure 31 : Satellite Jilin-1 07B

Source:

http://www.jl1.cn/EWeb/product_view.aspx?id=386

⁸ Orbite dont le plan conserve une orientation constante vis à vis de la direction Terre-Soleil, ainsi que les satellites qui les parcourent.

Annexe 2

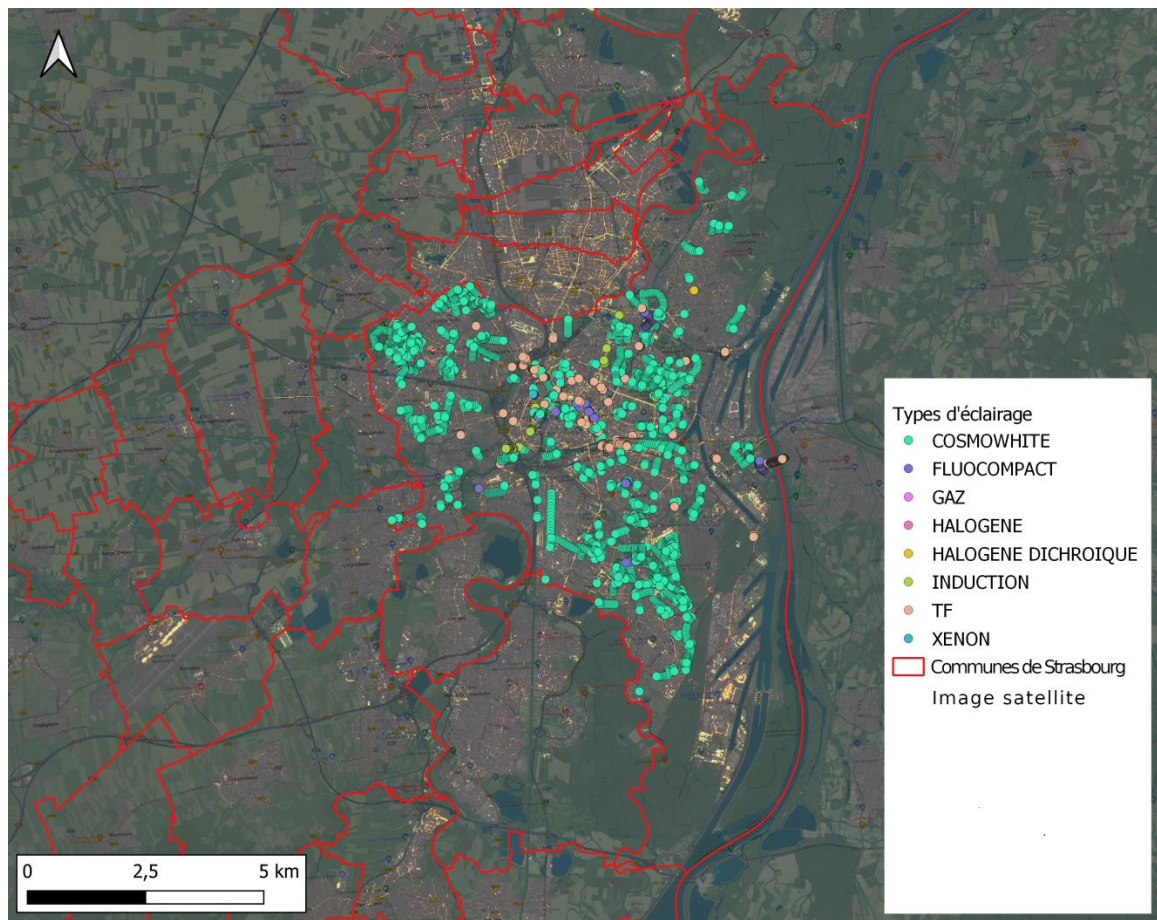


Figure 32 : Carte des localisations de différents types de lampadaires dans l'Eurométropole de Strasbourg

Source : IGN ; Eurométropole de Strasbourg

Auteur : Guillaume Yléann

Fond de carte : Google Satellite ; Google Maps

Annexe 3

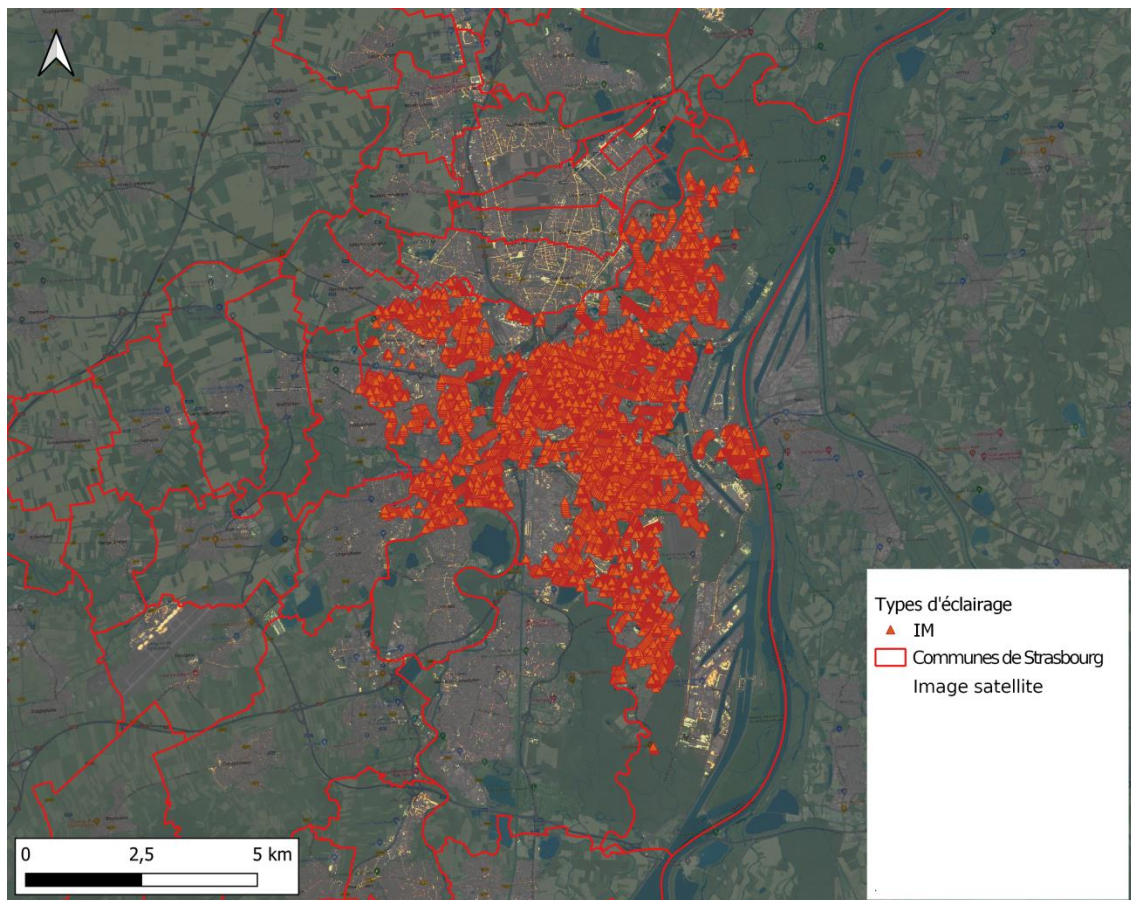


Figure 33 : Carte des localisations de type de lampadaires IM dans l'Eurométropole de Strasbourg

Source : IGN ; Eurométropole de Strasbourg

Auteur : Guillaume Yléann

Fond de carte : Google Satellite ; Google Maps

Annexe 4

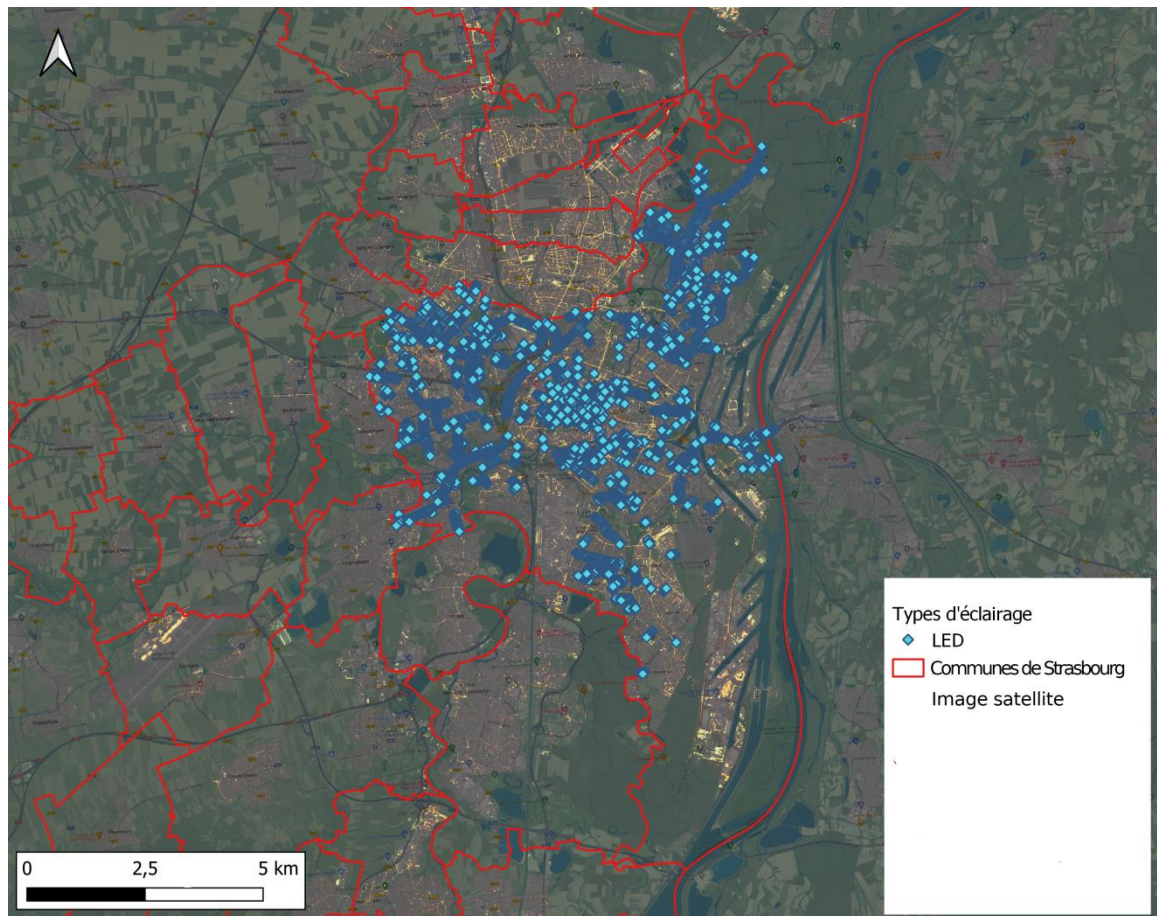


Figure 34 : Carte des localisations de type de lampadaires LED dans l'Eurométropole de Strasbourg

Source : IGN ; Eurométropole de Strasbourg

Auteur : Guillaume Yléann

Fond de carte : Google Satellite ; Google Maps

Annexe 5

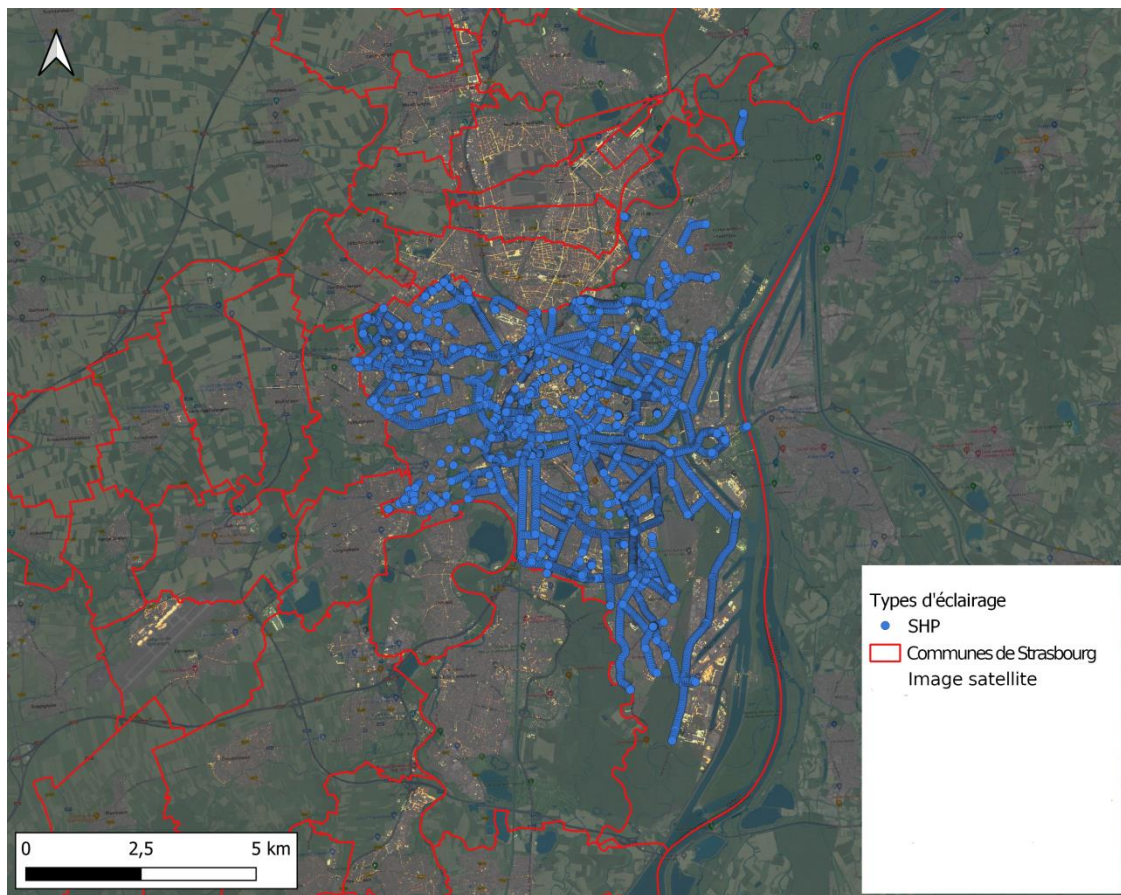


Figure 35 : Carte des localisations de type de lampadaires SHP dans l'Eurométropole de Strasbourg

Source : IGN ; Eurométropole de Strasbourg

Auteur : Guillaume Yléann

Fond de carte : Google Satellite ; Google Maps

Annexe 6

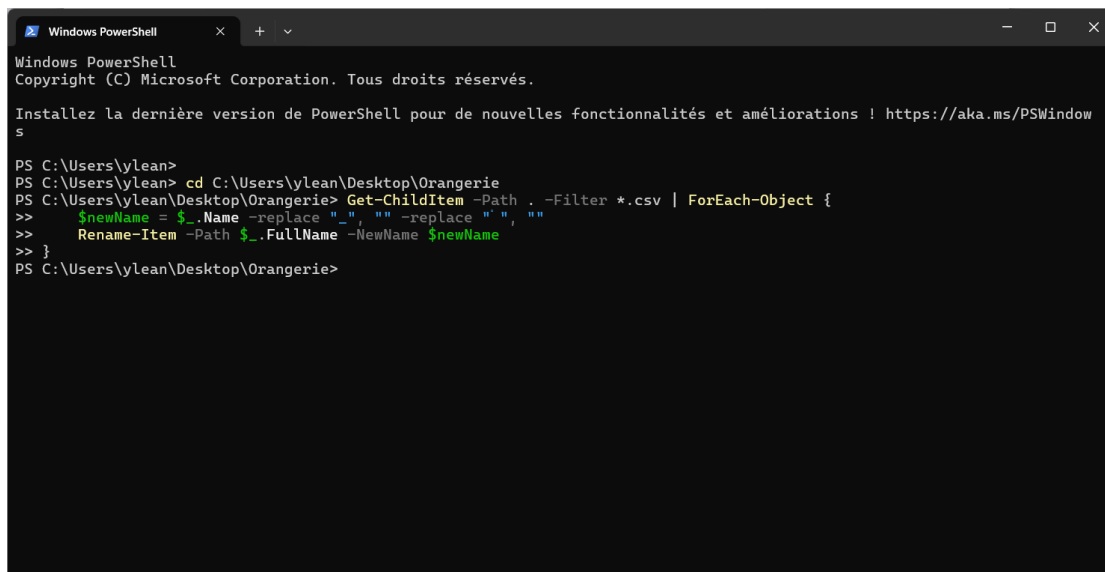
cd C:\ « Emplacement du dossier »

```
Get-ChildItem -Path . -Filter *.csv | ForEach-Object {
```

```
    $newName = $_.Name -replace "_", "" -replace "°", ""
```

```
    Rename-Item -Path $_.FullName -NewName $newName
```

```
}
```



```
Windows PowerShell
Copyright (C) Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

Installez la dernière version de PowerShell pour de nouvelles fonctionnalités et améliorations ! https://aka.ms/PSWindows

PS C:\Users\ylean>
PS C:\Users\ylean> cd C:\Users\ylean\Desktop\Orangerie
PS C:\Users\ylean\Desktop\Orangerie> Get-ChildItem -Path . -Filter *.csv | ForEach-Object {
>>     $newName = $_.Name -replace "_", "" -replace "°", ""
>>     Rename-Item -Path $_.FullName -NewName $newName
>> }
PS C:\Users\ylean\Desktop\Orangerie>
```

Annexe 7

```
Sub ConvertCSVtoXLSM()  
    Dim csvFolder As String  
    Dim csvFile As String  
    Dim wb As Workbook  
  
    ' Dossier contenant les fichiers CSV  
    csvFolder = "C:\Users\ylean\Desktop\luxmetre\  
  
    ' Recherche du premier fichier CSV dans le dossier  
    csvFile = Dir(csvFolder & "*.csv")  
  
    ' Boucle sur tous les fichiers CSV dans le dossier  
    Do While csvFile <> ""  
        ' Ouvre le fichier CSV en utilisant la méthode OpenText avec les paramètres corrects  
        Workbooks.OpenText Filename:=csvFolder & csvFile, _  
            Origin:=xlMSDOS, _  
            StartRow:=1, _  
            DataType:=xlDelimited, _  
            TextQualifier:=xlDoubleQuote, _  
            ConsecutiveDelimiter:=False, _  
            Tab:=False, _  
            Semicolon:=False, _  
            Comma:=True, _  
            Space:=False, _  
            Other:=False  
  
        ' Assigne le classeur ouvert à la variable wb  
        Set wb = ActiveWorkbook  
  
        ' Enregistre le fichier en format .xlsm  
        wb.SaveAs Filename:=csvFolder & Replace(csvFile, ".csv", ".xlsm"),  
        FileFormat:=xlOpenXMLWorkbookMacroEnabled  
  
        ' Ferme le fichier CSV  
        wb.Close SaveChanges:=False  
  
        ' Passe au fichier CSV suivant  
        csvFile = Dir  
    Loop  
End Sub
```

Annexe 8

```
Sub ProcessFilesInFolder()
    Dim folderPath As String
    Dim fileName As String
    Dim wb As Workbook
    Dim ws As Worksheet
    Dim lastRow As Long
    Dim colA As Variant
    Dim colB As Variant
    Dim newSheet As Worksheet

    folderPath = "C:\Users\ylean\Desktop\luxmetre\"
    fileName = Dir(folderPath & "*.xlsm")

    Do While fileName <> ""
        Set wb = Workbooks.Open(folderPath & fileName)
        Set ws = wb.Sheets(1) ' Assuming the data is in the first sheet
        ' Get the data from columns A and B
        colA = ws.Range("A1:A530").Value
        colB = ws.Range("B1:B530").Value

        ' Process columns A and B
        For i = 1 To 530
            colA(i, 1) = Replace(Replace(Replace(colA(i, 1), "[", ""), "]", ""), "''", "")
            colA(i, 1) = Replace(colA(i, 1), ".", ",")
            colB(i, 1) = Replace(Replace(Replace(colB(i, 1), "[", ""), "]", ""), "''", "")
            colB(i, 1) = Replace(colB(i, 1), ".", ",")
        Next i

        ' Transpose data into new rows
        Set newSheet = wb.Sheets.Add(After:=ws)
        newSheet.Name = "Transposed Data"
        newSheet.Range("A1:TJ1").Value = Application.Transpose(colB)
        newSheet.Range("A2:TJ2").Value = Application.Transpose(colA)

        ' Delete the second row
        newSheet.Rows(2).Delete
        ' Save and close the workbook
        wb.Close SaveChanges:=True
        ' Move to the next file
        fileName = Dir
    Loop
End Sub
```

Annexe 9

```
Sub ConsolidateTransposedData()
    Dim folderPath As String
    Dim fileName As String
    Dim destWb As Workbook
    Dim destWs As Worksheet
    Dim sourceWb As Workbook
    Dim sourceWs As Worksheet
    Dim lastRow As Long
    Dim destRow As Long

    folderPath = "C:\Users\ylean\Desktop\luxmetre\"
    fileName = Dir(folderPath & "*.xlsm")
    ' Create a new workbook for consolidated data
    Set destWb = Workbooks.Add
    Set destWs = destWb.Sheets(1)
    destWs.Name = "Consolidated Data"

    ' Start copying data from row 2
    destRow = 2
    Do While fileName <> ""
        Set sourceWb = Workbooks.Open(folderPath & fileName)
        On Error Resume Next
        Set sourceWs = sourceWb.Sheets("Transposed Data")
        On Error GoTo 0

        If Not sourceWs Is Nothing Then
            ' Find the last used column in the source sheet
            lastRow = sourceWs.Cells(1, sourceWs.Columns.Count).End(xlToLeft).Column
            ' Copy the data from Transposed Data sheet to Consolidated Data sheet
            sourceWs.Range(sourceWs.Cells(1, 1), sourceWs.Cells(1, lastRow)).Copy _
                Destination:=destWs.Cells(destRow, 1)

            destRow = destRow + 1
        End If
        sourceWb.Close SaveChanges:=False
        fileName = Dir
    Loop

    ' Save the consolidated workbook
    destWb.SaveAs folderPath & "ConsolidatedData.xlsx"
    destWb.Close
End Sub
```

Annexe 10

Rouge (R) en hexadécimal

Prenons une valeur de rouge, par exemple, 255. Pour la convertir en hexadécimal :

1. Divisez la valeur par 16 et prenez le quotient et le reste.
2. Le quotient et le reste sont les deux chiffres hexadécimaux.

Pour 255 :

- 255 divisé par 16 donne un quotient de 15 et un reste de 15.
- En hexadécimal, 15 est représenté par "F".

Donc, 255 en hexadécimal est "FF".

Vert (G) en hexadécimal

Prenons une valeur de vert, par exemple, 128 :

- 128 divisé par 16 donne un quotient de 8 et un reste de 0.
- En hexadécimal, 8 reste 8 et 0 reste 0.

Donc, 128 en hexadécimal est "80".

Bleu (B) en hexadécimal

Prenons une valeur de bleu, par exemple, 64 :

- 64 divisé par 16 donne un quotient de 4 et un reste de 0.
- En hexadécimal, 4 reste 4 et 0 reste 0.

Donc, 64 en hexadécimal est "40".

Combinaison des valeurs hexadécimales

Après avoir converti chaque composant RVB en hexadécimal, je les combine pour obtenir la couleur au format HTML. Je place les valeurs de rouge, vert et bleu ensemble, précédées d'un dièse (#).

Par exemple, pour les valeurs RVB (255, 128, 64) :

- Rouge (255) en hexadécimal est "FF".
- Vert (128) en hexadécimal est "80".
- Bleu (64) en hexadécimal est "40".

La couleur HTML est donc "#FF8040".

Lexique :

Température de couleur

La température de couleur fait référence à la chromaticité d'un objet chauffé (souvent appelé un corps noir), qui varie selon sa température. Elle est mesurée en Kelvin (K) et indique la température d'un objet chauffé à une certaine couleur ou chromaticité. Plus la température de couleur est élevée, plus la lumière est bleue et plus la valeur en Kelvin est grande. Inversement, plus la température de couleur est basse, plus la lumière est rouge et plus la valeur en Kelvin est petite. Le tracé des changements de températures de couleur sur un diagramme de chromaticité xy est appelé le locus de radiation du corps noir.

Température de couleur corrélée

Toutes les sources lumineuses ne correspondent pas au locus de radiation du corps noir lors de la mesure. Dans ce cas, on utilise la température de couleur corrélée. C'est une température de couleur obtenue en traçant une ligne d'isotherme à partir du locus de radiation du corps noir, qui correspond à la valeur mesurée.

Lumière

La lumière se réfère à la longueur d'onde électromagnétique allant de 380 nm à 780 nm, détectable par l'œil humain.

Corps noir

Théoriquement, un corps noir est un objet qui absorbe toutes les longueurs d'onde et qui, lorsqu'il est chauffé, émet une lumière équivalente à la température de couleur appliquée.

Radiation du corps noir

Cela désigne la lumière émise par un corps noir. La quantité d'énergie libérée pour chaque longueur d'onde change avec la température de couleur appliquée, ce qui entraîne des variations de couleur visibles.

K

Exprimé en Kelvin absolu, avec des unités de "K". 0 K équivaut à -273,15 °C ou -459,67 °F.

uv

La déviation entre la température de couleur corrélée et le locus de radiation du corps noir. Lorsque la température de couleur corrélée est au-dessus du locus de radiation du corps noir, un signe "+" est attribué ; lorsqu'elle est en dessous, un signe "-" est attribué.

IRC (Indice de rendu des couleurs)

Quantifie la fidélité de l'apparence des couleurs sous une source de lumière mesurée comparée à leur apparence sous une source de lumière standard. Les différences sont exprimées pour des teintes individuelles, R1-R15, ou comme une moyenne (Ra) des valeurs R1 à R8.

CIE1931

Il s'agit du système trichromatique basé sur la fonction de correspondance des couleurs, $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, et $z(\lambda)$, adopté par la CIE en 1931. Ce système est également appelé le système de couleurs XYZ avec un angle de vision de 2° . Il est appliqué lorsque le champ de vision est de 4° ou moins.

CIE1964

Il s'agit du système trichromatique basé sur la fonction de correspondance des couleurs, $x_{10}(\lambda)$, $y_{10}(\lambda)$, et $z_{10}(\lambda)$, adopté par la CIE en 1964. Ce système est également appelé le système de couleurs XYZ avec un angle de vision de 10° . Il est appliqué si le champ de vision dépasse 4° .

CIE1976

Ce diagramme de chromaticité possède une échelle où le sens de différence des couleurs avec la même illuminance devient proportionnel à la distance géométrique sur le diagramme à tous les points du diagramme de chromaticité, déterminé par la CIE en 1976. Il est calculé par la formule basée sur les valeurs tristimulus⁹ X, Y, et Z ou les coordonnées de chromaticité x et y du système de couleurs XYZ.

Champ de vision

Les observateurs standards de la CIE aident à corréler les mesures de couleur instrumentales avec les évaluations visuelles humaines. Le champ de vision de 2 degrés est couramment utilisé dans les procédures de contrôle de qualité et d'évaluation des couleurs, en particulier pour les applications alimentaires. Le champ de vision de 10 degrés est considéré comme plus représentatif de l'utilisation commune de l'œil humain avec les spectrophotomètres pour la formulation et l'évaluation de la couleur de divers types d'échantillons.

⁹ tristimulus = Combinaison des trois stimulus visuels du XYZ.

Table des illustrations :

Figure 1 : Panneaux d'information de coupure d'éclairage public.....	6
Figure 2 : Comparaison des restrictions lumineuses dans l'Eurométropole de Strasbourg entre Avril 2023 et Février 2024, partie grise soumise à un horaire d'extinction	7
Figure 3 : Image de la pollution lumineuse du satellite Jilin dans l'Eurométropole de Strasbourg.....	10
Figure 4 : signatures spectrales de différentes sources lumineuses.....	20
Figure 5 : Représentation Visuelle de la Température de Couleur en Kelvin et des Types de Lumière Correspondants	24
Figure 6 : Tableau regroupant l'impact de différentes bandes spectrales de la lumière sur différents groupes d'espèces.....	29
Figure 7 : Risques d'impacts sur la biodiversité en fonction des longueurs d'ondes perçus.....	30
Figure 8 : Niveau de la pollution lumineuse en France métropolitaine.....	35
Figure 9 : Signature spectrale des différents types de LED.....	36
Figure 10 : Spectre d'une lampe à sodium haute pression	38
Figure 11 : Spectre d'une lampe à iodure métallique	38
Figure 12 : Variables d'éclairage à considérer dans un réseau écologique.....	40
Figure 13 : Carte des localisations de nichoir placé dans l'Eurométropole de Strasbourg.....	43
Figure 14 : Carte des sites sur lesquels nous avons effectué des relevés Luxmètre et GPS	43
Figure 15 : Quadrillage de la zone (site de l'Orangerie) réalisé sur Qgis	44
Figure 16 : Marquage au sol des points à relevés.....	44
Figure 17 : Utilisation d'un Luxmètre-Chromamètre	45
Figure 18 : Utilisation d'un GPS Geo Explorer	47
Figure 19 : Quadrillage de la zone (site : station de tram Starcoop) réalisé sur Qgis.....	47
Figure 21 : Superposition de l'image satellite et de l'interpolation du parc de l'Orangerie.....	57
Figure 22 : Superposition de l'image satellite et de l'interpolation de la station de tram Starcoop.....	58
Figure 23 : Superposition de l'image satellite et de l'interpolation de la rue d'Oslo	58
Figure 24 : Valeurs en Kelvin des points luxmètres du parc de l'Orangerie	62
Figure 25 : Valeurs en Kelvin des points luxmètres du parc de la station de tram Starcoop	63
Figure 26 : Valeurs en Kelvin des points luxmètres de la rue d'Oslo.....	64
Figure 27 : Couleur RVB des points luxmètres de la rue d'Oslo	69
Figure 28 : Couleur RVB normalisé des points luxmètres de la rue d'Oslo.....	71
Figure 29 : Couleur RVB normalisé des points luxmètres du parc de l'Orangerie	72
Figure 30 : Couleur RVB normalisé des points luxmètres de la station de tram Starcoop.....	72
Figure 31 : Satellite Jilin-1 07B.....	78
Figure 32 : Carte des localisations de différents types de lampadaires dans l'Eurométropole de Strasbourg.....	79
Figure 33 : Carte des localisations de type de lampadaires IM dans l'Eurométropole de Strasbourg.....	80
Figure 34 : Carte des localisations de type de lampadaires LED dans l'Eurométropole de Strasbourg.....	81
Figure 35 : Carte des localisations de type de lampadaires SHP dans l'Eurométropole de Strasbourg.....	82

Bibliographie

- (2020, 29 mai). Why Do Wolves' Eyes Glow in the Dark ? | Wolf Conservation Center. Wolf Conservation Center. <https://nywolf.org/fr/2020/05/why-do-wolves-eyes-glow-in-the-dark-4/>
- @NatGeoFrance. « Vous voulez sauver la biodiversité ? Éteignez la lumière. » National Geographic, 6 avril 2023, <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/vous-voulez-sauver-la-biodiversite-eteignez-la-lumiere>.
- Actu-environnement. (s. d.). Pollution lumineuse : sa hausse soulève la question de l'utilité de l'éclairage. Actu-Environnement. <https://www.actu-environnement.com/ae/news/france-pollution-lumineuse-hausse-41058.php4>
- Anpcen. (s. d.). > Notre actualité - ANPCEN. https://www.anpcen.fr/?id_rub=&id_ss_rub=127&id_actudetail=257.%20Consult%C3%A9%20le%2013%20avril%202024.
- Anpcen. (s. d.). Découvrir les enjeux de la qualité de la nuit. https://www.anpcen.fr/index.php5?id_rub=11&rub=d%E9couvrir-les-enjeux-de-la-qualit%E9-de-la-nuit&ssrub=
- B&L évolution. (2020, 16 mai). Pollution lumineuse à Strasbourg – 2014 - BL évolution. BL Évolution. <https://www.bl-evolution.com/publication/pollution-lumineuse-strasbourg/>
- Bogard, P., éditeur. Let there be night: testimony on behalf of the dark. University of Nevada Press, 2008.
- Bogard, Paul. The end of night: searching for natural darkness in an age of artificial light. First edition, Little, Brown, and Company, 2013.
- Calculatrice de conversion Lumens en Candela (CD). (s. d.). <https://www.rapidtables.org/fr/calc/light/lumen-to-candela-calculator.html.%20Consult%C3%A9%20le%2020%20juin%202024>.
- Caudron, T., « La pollution lumineuse en France a augmenté de 94 % en 30 ans ! » Futura, <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/pollution-pollution-lumineuse-france-augmente-94-30-ans-94682/>. Consulté le 30 mai 2024.
- Challéat, S., 2019, Sauver la nuit. Comment l'obscurité disparaît, ce que sa disparition fait au vivant, et comment la reconquérir, Paris, Premier Parallèle, 296 p.
- Challéat, S., Barré, K., Laforge, A., et al. (2021). Grasping darkness : the dark ecological network as a social-ecological framework to limit the impacts of light pollution on biodiversity. Ecology And Society, 26(1). <https://doi.org/10.5751/es-12156-260115>
- Challéat, S., « Empreinte lumineuse, trame nocturne et corridors noirs : quelques précisions ». RENOIR research group | Interdisciplinary Night-time Environment Observatory, 16 novembre 2015, <https://doi.org/10.58079/tm10>.
- Charnay, B. (2019, 7 octobre). Lumière bleue - le guide de l' # 039 ; éclairage. Le Guide de

- L'éclairage. <https://leclairage.fr/lumiere-bleue/>
- Charnay, B., « IRC : Indice de Rendu des Couleurs ». le guide de l'éclairage, 9 mai 2014, <https://leclairage.fr/irc/>.
- Chris, B., (2024, 20 juin). Indice de rendu de couleur. Lumeninside. <https://lumeninside.fr/indice-de-rendu-de-couleur/>
- CL-70F Luxmètre-Chromamètre IRC. (s. d.). <https://www.konicaminolta.fr/fr-fr/produits/instruments-de-mesure/lumiere-ecrans/luxmetres-chromametres/cl-70f>
- Czaja, M., & Balandra, A. (2023, 22 mars). Strasbourg va éteindre d'ici un an la moitié de son éclairage public la nuit. Ici Par France Bleu et France 3. <https://www.francebleu.fr/infos/societe/strasbourg-va-eteindre-d-ici-un-an-la-moitie-de-son-eclairage-public-la-nuit-2989070>
- Demeersman, X., « Pollution lumineuse : 80 % d'entre nous ne voient plus les étoiles ». Futura, <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronomie-pollution-lumineuse-80-nous-ne-voient-plus-etoiles-63150/>. Consulté le 30 mai 2024.
- Dewdney, C., *Acquainted with the night: excursions through the world after dark*. 1st U.S. ed, Bloomsbury : Distributed to the trade by Holtzbrinck Publishers, 2004. (Pages 42-66)
- École normale supérieure de Lyon. (s. d.). Pollution lumineuse — Géoconfluences. 2002 Géoconfluences ENS de Lyon. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/pollution-lumineuse>
- Efficacité lumineuse spectrale. Wikipédia, 4 janvier 2024. Wikipedia, https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Efficacit%C3%A9_lumineuse_spectrale&oldid=211191170#Vision_photopique.
- Eklöf, J., *The Darkness Manifesto: On Light Pollution, Night Ecology, and the Ancient Rhythms That Sustain Life*. First Scribner hardcover edition, Scribner, 2023.
- eMascaró. (s. d.). Comment mesure-t-on la lumière ? Unités de mesure et luxmètre | Faro Barcelona. FARO. <https://faro.es/fr/blog/comment-mesure-t-on-la-lumiere/>
- Extinction progressive de l'éclairage public à Strasbourg. (s. d.). Strasbourg.eu. <https://www.strasbourg.eu/extinction-eclairage-public-strasbourg>
- Ezrati, J.-J., & Caratti-Zarytkiewicz, R. (2017, 11 mai). Lumière bleue LED : 3 paramètres à prendre en compte - Light ZOOM Lumière - Portail de la Lumière et de l'Éclairage. Light ZOOM Lumière - Portail de la Lumière et de l'Éclairage. <https://www.lightzoomlumiere.fr/article/lumiere-bleue-led-3-parametres-a-prendre-en-compte/>.
- From XYZ to RGB :: Ocean Optics Web Book. (s. d.). <https://www.oceanopticsbook.info/view/photometry-and-visibility/from-xyz-to-rgb>. Consulté le 20 juin 2024.
- Gilles, B. (2021, 16 mars). vision des insectes - partie 3 : recepteurs physiologiques, couleurs et polarisation. <https://passion-entomologie.fr/vision-des-insectes-recepteurs-physiologiques-couleurs-et-polarisation/>
- Gilles, L. (2019, 23 janvier). Jilin-1 07 et 08, Lingque 1A et Xiaoxiang1-03 ont été mis sur

- orbite par Long March 11. 4space. <https://4space.fr/l-actualite-des-satellites/jilin-1-07-et-08-lingque-1a-et-xiaoxiang1-03-ont-ete-mis-sur-orbite-par-long-march-11/>
- Goronczy, E. E. (2021). Light Pollution in Metropolises. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-29723-7> (pages 5-31 ; 129-169)
- Ignasse, J. (2014, 17 décembre). La lumière bleue peut tuer les insectes. Sciences et Avenir. https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/la-lumiere-bleue-pour-tuer-les-insectes_15302
- Images Jilin-1 | Trame verte et bleue. (s. d.). <https://tvb.espaces-naturels.fr/outils-methodes/donnees-mobilisables/images-jilin-1>. Consulté le 10 avril 2024.
- Ishihara, Daisuke, et al. « Vein–Membrane Interaction in Cambering of Flapping Insect Wings ». *Biomimetics*, vol. 8, n° 8, 8, décembre 2023, p. 571. www.mdpi.com, <https://doi.org/10.3390/biomimetics8080571>.
- Jackson, L. (2024, 1 janvier). Comment calculer les niveaux de lux - Science - 2024. Mosg-portal. <https://fr.mosg-portal.com/calculate-lux-levels-6953934-1650>
- Jilin Constellation - EOPortal. (2022, 27 juillet). <https://www.eoportal.org/satellite-missions/jilin-con>
- Jilin-1 07B. PCI Geomatics Enterprises, Inc.®, 2024. https://catalyst.earth/catalyst-system-files/help/references/gdb_r/Jilin-1-07B.html. Consulté le 17 juin 2024.
- Kaspar, N., (2021, 20 avril). Pollution lumineuse à Strasbourg : la Ville nous rendra-t-elle les étoiles ? Pokaa. <https://pookaa.fr/2020/11/26/pollution-lumineuse-a-strasbourg-la-ville-nous-rendra-t-elle-les-etoiles-enseigne/>
- Kaspar, N., « À Strasbourg en 2024, la moitié de l'éclairage public sera éteint de 1h à 5h du matin ». Pokaa, 4 avril 2023, <https://pookaa.fr/2023/04/04/a-strasbourg-en-2024-la-moitie-de-leclairage-public-sera-eteint-de-1h-a-5h-du-matin/>.
- Kyba, C. M., et al. « Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022 ». *Science*, vol. 379, n° 6629, janvier 2023, p. 265-68. science.org (Atypon), <https://doi.org/10.1126/science.abq7781>.
- L'analyse des images satellite nocturnes pour mieux préserver la biodiversité | Cerema. (s. d.). Cerema. <http://www.cerema.fr/fr/actualites/analyse-images-satellite-nocturnes-mieux-preserver>
- L'éclairage public partiellement et progressivement éteint au cœur de la nuit. (s. d.). <https://www.strasbourg.eu/-/webmag-eclairage-public-202303>
- La pollution lumineuse (3/3) : Lutter contre la pollution lumineuse, avril 2017. CultureSciences Physique - ISSN 2554-876X, <https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/pollution-lumineuse-3.xml>
- La pollution lumineuse menace les oiseaux, mais des solutions sont facilement disponibles. (2022, 19 mai). ONU Info. <https://news.un.org/fr/story/2022/05/1120052>
- La pollution lumineuse, qu'est-ce que c'est ? | Cerema. (s. d.). Cerema. <https://www.cerema.fr/fr/congres-mondial-nature-uicn-2020/pollution-lumineuse>
- La pollution lumineuse, une pollution silencieuse ! | EDF FR. 15 septembre 2023,

<https://www.edf.fr/groupe-edf/inventer-lavenir-de-lenergie/rd-un-savoir-faire-mondial/toutes-les-actualites-de-la-rd/la-pollution-lumineuse-une-pollution-silencieuse>.

LA Rédaction, 9 octobre 2015. « Le fléau de la pollution lumineuse ». Geo.fr, <https://www.geo.fr/animaux/le-fleau-de-la-pollution-lumineuse-158318>.

Les enjeux de la pollution lumineuse. (s. d.). <https://www.parc-golfe-morbihan.bzh/les-enjeux-de-la-pollution-lumineuse/>

Levin, N., et al. « A new source for high spatial resolution night time images — The EROS-B commercial satellite ». *Remote Sensing of Environment*, vol. 149, juin 2014, p. 1-12. ScienceDirect, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.019>.

Light pollution map. (s. d.).

<https://www.lightpollutionmap.info/#zoom=1.58&lat=27.3024&lon=0.0000&state=eyJiYXNlbWFWljoiTGF5ZXJCaW5nUm9hZCIsIm92ZXJsYXkiOiJ2aWlyc18yMDIzIiwib3ZlcmxheWNvbG9yIjpmYWxzZSwib3ZlcmxheW9wYWNPdHkiOjY0LCJmZWV0dXJlc29wYWNPdHkiOjgwfQ==>.

Mayer, N., « La pollution lumineuse est dévastatrice pour la faune et la flore ». Futura, <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/nature-pollution-lumineuse-devastatrice-faune-flore-83990/>. Consulté le 30 mai 2024.

Mizon, B., *Light Pollution: Responses and Remedies*. 2nd ed, Springer New York, 2012 (pages 62-77)

Kohei, N., et Schreuder, D., *Light Pollution Handbook*. Springer Netherlands, 2004.

Notre-environnement. (2024, 25 avril). Pollution lumineuse : quelle part du territoire français est concernée ? Notre-environnement. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/actualites/breves/article/pollution-lumineuse-quelle-part-du-territoire-francais-est-concernee>

Orphek. (2012, 18 juillet). COMPRENDRE KELVIN, LUX, LUMENS, PAR, ET PUR. Orphek Reef Aquarium LED Lighting. <https://fr.orphek.com/understanding-kelvin-lux-lumens-par-and-pur/>

Pollution lumineuse / Trame noire | Trame verte et bleue. (s. d.). <https://www.trameverteetbleue.fr/entree-thematique/pollution-lumineuse-trame-noire>

Pollution lumineuse : un phénomène massif en zones urbaines | vie-publique.fr. 14 février 2023, <http://www.vie-publique.fr/en-bref/288093-pollution-lumineuse-un-phenomene-massif-en-zones-urbaines>.

Pollution lumineuse | Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires. (s. d.). Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires. <https://www.ecologie.gouv.fr/pollution-lumineuse>

Pollution lumineuse | Portail des parcs nationaux de France. (s. d.). <https://www.parcsnationaux.fr/fr/des-connaissances/enjeux/pollution-lumineuse>

Pollution lumineuse au GeoDataLab | La TeleScop. (2021, 10 septembre). <https://www.latelescop.fr/2021/09/10/pollution-lumineuse-au-geodatalab/>

- Réduire la pollution lumineuse, l'éclairage des sciences comportementales | Direction interministérielle de la transformation publique. (s. d.). Direction Interministérielle de la Transformation Publique. <https://www.modernisation.gouv.fr/publications/reduire-la-pollution-lumineuse-leclairage-des-sciences-comportementales>
- Rich, C., et Longcore, T., éditeurs. Ecological consequences of artificial night lighting. Island Press, 2006.
- Robertson, D., All through the Night: Why Our Lives Depend on Dark Skies. HarperNorth, 2023.
- Science for Environment Policy (2023) Light Pollution: Mitigation measures for environmental protection. Future Brief 28. Brief produced for the European Commission DG Environment by the Science Communication Unit, UWE Bristol. Available at: https://ec.europa.eu/science_environment-policy.
- Sertit. (2022, 11 octobre). Étude de la pollution lumineuse grace aux images satellite - sertit. Sertit. <https://sertit.unistra.fr/news/etude-de-la-pollution-lumineuse-grace-aux-images-satellite/>
- Service Dvlpt ALEAUR. (s. d.). Pollution lumineuse. ALEAUR Net /. <http://risquesenvironnementaux-collectivites.oree.org/le-guide/risques-mon-territoire/sante-environnement/pollution-lumineuse.html>
- Sordello R. (2017). Pollution lumineuse : longueurs d'ondes impactantes pour la biodiversité. Exploitation de la synthèse bibliographique de Musters et al. (2009). UMS 2006 Patrimoine naturel AFB-CNRS-MNHN. Rapport Patrinat n°2017-117. 18 p
- Sordello R., Amsallem J., Azam C., et al. (2018). Construire des indicateurs nationaux sur la pollution lumineuse. Réflexion préliminaire. UMS PatriNat, Cerema, CESCO, DarkSkyLab, IRD, Irstea. 47 pages.
- Sordello R., Paquier F. and 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 <https://bit.ly/2Quy7nv>
- Sordello R., Vanpeene S., Azam C., Kerbirou C., Le Viol I. & Tallec T. (2014). Effet fragmentant de la lumière artificielle. Quels impacts sur la mobilité des espèces et comment peuvent-ils être pris en compte dans les réseaux écologiques ?. Muséum national d'Histoire naturelle, Centre de ressources Trame verte et bleue. 31 pages.
- Sordello, R., « Pistes méthodologiques pour prendre en compte la pollution lumineuse dans les réseaux écologiques ». VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement, n° Volume 17 Numéro 3, Volume 17 Numéro 3, décembre 2017. journals.openedition.org, <https://doi.org/10.4000/vertigo.18730>.
- Stimac, V., Dark skies: a practical guide to astrotourism. Lonely Planet, 2019. (pages 37)
- Strange Loop 2019 - RGB to XYZ : The Science and History of Color. (2019, 13 septembre). Sourcegraph. <https://sourcegraph.com/blog/strange-loop/strange-loop-2019-rgb-to-xyz-the-science-and-history-of-color>
- The world at night : preserving natural darkness for heritage conservation and night sky appreciation | Trame verte et bleue. (s. d.). <https://www.trameverteetbleue.fr/documentation/references-bibliographiques/world->

night-preserving-natural-darkness-heritage. Consulté le 13 avril 2024.

Tossa, P., et Souques, M., « Lumière artificielle nocturne et pollution lumineuse : une synthèse des effets sur les rythmes biologiques chez l'homme ». *Environnement, Risques & Santé*, vol. 18, n° 6, 2019, p. 477-87.

Trame noire | Trame verte et bleue. (s. d.). <https://www.trameverteetbleue.fr/vie-tvb/groupe-echange-tvb/trame-noire>

Trame noire. (s. d.). <https://www.ofb.gouv.fr/trame-verte-et-bleue/trame-noire>

Un nouvel indicateur pour mesurer la pollution lumineuse. (s. d.). Drupal. <https://www.ofb.gouv.fr/actualites/un-nouvel-indicateur-pour-mesurer-la-pollution-lumineuse>

Van Der Ham, M. (s. d.). « Intensité lumineuse : dans une direction donnée, la candela ». *Light ZOOM Lumière - Portail de la Lumière et de l'Éclairage*, <https://www.lightzoomlumiere.fr/definition/intensite-lumineuse-dans-direction-donnee-candela-photometrie/>.

Vidard, M., Montagner, C. L., Ayestaray, V., Dupin, T., Crosnier, C., Sarfaty, L., & Massardier, A. (2020, 8 décembre). *La pollution lumineuse*. France Inter. <https://www.radiofrance.fr/franceinter/podcasts/la-terre-au-carre/la-pollution-lumineuse-2106760>

Welch, D., Dick, R., Treviño, K., Longcore, T., Rich, C., Hearnshaw, J., Ruggles, C., Dalton, A., Barentine, J. & Gyarmathy, I. (2024). *The world at night: Preserving natural darkness for heritage conservation and night sky appreciation*. IUCN WCPA Good Practice Guidelines Series No. 33, Gland, Switzerland: IUCN.

Wikipedia contributors. (2024, 1 juin). SRGB. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=SRGB&oldid=1226800876>.

Zone Atelier Environnementale Urbaine. (2023, 13 juin). *ZAEU - Présentation de la zone Atelier Environnementale Urbaine*. <https://zaeu-strasbourg.eu/presentation/presentation-zaeu/>