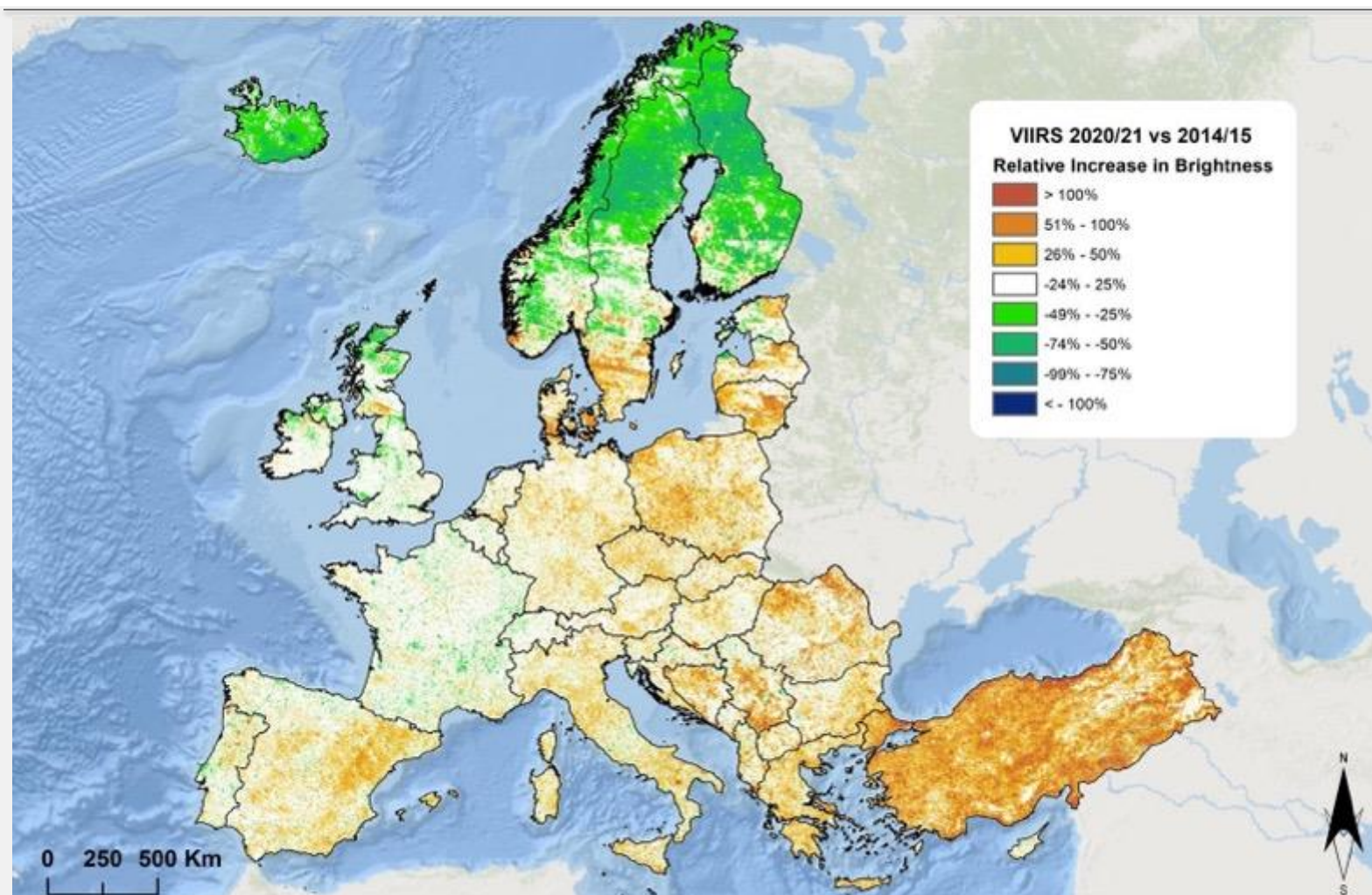


Examen et évaluation des informations disponibles sur la pollution lumineuse en Europe



Auteurs :

Kaja Widmer (Swiss TPH), Anton Beloconi (Swiss TPH),
Ian Marnane (EEA), Penelope Vounatsou (Swiss TPH)

Conception de la couverture : AEE
Image de couverture © ETC HE / Swiss TPH
Layout : EEA / ETC HE

Date de publication : Novembre 2022

ISBN 978-82-93970-08-8

Avis juridique

La préparation de ce rapport a été financée par l'Agence européenne pour l'environnement dans le cadre d'une subvention avec le Centre thématique européen sur la santé humaine et l'environnement (CTE-HE) et exprime les opinions des auteurs. Le contenu de cette publication ne reflète pas nécessairement la position ou l'opinion de la Commission européenne ou d'autres institutions de l'Union européenne.

Ni l'Agence européenne pour l'environnement ni le Centre thématique européen sur la santé humaine et l'environnement ne sont responsables de toute conséquence découlant de la réutilisation des informations contenues dans cette publication.

Comment citer ce rapport :

Widmer, K., Beloconi, A., Marnane, I., Vounatsou, P., (2022). Review and Assessment of Available Information on Light Pollution in Europe (Eionet Report – ETC HE 2022/8), ISBN 978-82-93970-08-8, ETC HE c/o NILU, Kjeller, Norway.

Le rapport est disponible à l'adresse suivante : <https://www.eionet.europa.eu/etcs/all-etc-reports> et <https://zenodo.org/communities/eea-etc/?page=1&size=20>.

La traduction française de ce rapport a été effectuée par l'Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environnement Nocturnes (ANPCEN). Traducteur : Marc Vidal-Alaiz, Relecteurs : Christophe Martin-Brisset, Michel Deromme
<https://www.anpcen.fr>

Coordinateur de l'ETC HE : NILU - Stiftelsen Norsk institutt for luftforskning (NILU - Institut norvégien de recherche sur l'air)

Partenaires du consortium ETC HE : Federal Environment Agency/Umweltbundesamt (UBA), Aether Limited, Czech Hydrometeorological Institute (CHMI), Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Swiss Tropical and Public Health Institute (Swiss TPH), Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), 4sfera Innova S.L.U., klarFAKTe.U

Avis de droit d'auteur

© European Topic Centre on Human health and the environment, 2022

La reproduction est autorisée à condition que la source soit mentionnée. [Creative Commons Attribution 4.0 (International)]

De plus amples informations sur l'Union européenne sont disponibles sur Internet (<http://europa.eu>).

Table des matières

Remerciements	5
Résumé	6
1 Introduction	8
2 Principaux effets de la pollution lumineuse	10
2.1 Santé humaine	11
2.1.1 Synthèse de la littérature	11
2.1.2 Évaluation critique.....	18
2.2.1 Changements de comportement	20
2.2.2 Modèles d'activité ajustés	22
2.2.3 Altérations physiologiques	23
2.2.4 Remarques finales sur les conséquences écologiques	24
3 Base législative pour surveiller et contrôler la pollution lumineuse	27
3.1 États membres de l'UE	27
3.1.1 Politiques nationales	27
3.1.2 Politiques régionales.....	29
3.1.3 Pas de politiques, seulement des lignes directrices non contraignantes	29
3.2 Approches globales pour atténuer la pollution lumineuse	32
3.2.1 Politique dépendant de mesures strictes	32
3.2.2 Une politique couplée à une approche éducative	32
3.2.3 Politique intégrée dans la législation existante	33
3.2.4 Formulation d'une politique en collaboration avec la communauté astronomique.....	33
4 Normes et méthodes de surveillance pour évaluer la pollution lumineuse	34
4.1 Quantifier la lumière dans l'environnement	34
4.2 Dispositifs commerciaux	34
4.2.1 Mesure de la qualité du ciel (SQM)	34
4.2.2 Compteur de lumière à base de cellules solaires	34
4.2.3 Luxmètre et luminancemètre	35
4.2.4 Appareils photo numériques avec objectif Fisheye/grand angle	35
4.2.5 Compter les étoiles	35
4.3 Méthodes haut de gamme	35
4.3.1 Imagerie satellite.....	35
4.3.2 Spectroscopie.....	36
4.3.3 Moniteur de transmission tous azimuts (ASTMON).....	36
4.3.4 Mosaique du ciel.....	37
4.4 Seuils et indicateurs de suivi	37
5 Tendances temporelles de la pollution lumineuse	41
5.1 Tendances les plus récentes	41
5.2 Comparaison des pays de l'EEE.....	44
5.4 Tendances historiques.....	50
6 Recherche actuelle en Europe	53
6.1 Recherche écologique	53
6.2 Recherche visant à améliorer les méthodes de mesure.....	54
6.3 Recherche socio-économique.....	55

7	Questions émergentes	58
7.1	Problèmes techniques liés à l'imagerie satellitaire.....	58
7.1.1	Les caractéristiques de la lumière émise	58
7.1.2	L'influence des conditions météorologiques, de la luminosité de la lune et des aurores boréales.....	59
7.1.3	Limites de la source de données collectées	63
7.2	Interaction de la pollution lumineuse avec d'autres polluants.....	63
7.3	La pollution lumineuse liée aux mouvements de population	63
	Liste des abréviations.....	65
	Références.....	66
	Annexe.....	77

Remerciements

Tous les auteurs remercient chaleureusement les réviseurs de l'UBA, André Conrad, Volker Mohaupt et Pia Splanemann, pour leurs commentaires et réactions utiles reçus au cours des processus de consultation entre avril et novembre 2022, ainsi que l'Agence fédérale pour la protection de la nature (BfN) et l'Office fédéral de protection contre les radiations (BfS) pour leur contribution et leurs réactions. En outre, nous sommes reconnaissants pour les nouvelles connaissances acquises lors de l'atelier sur la pollution lumineuse 2022 à Brno, en République tchèque, qui ont été incorporées dans ce rapport.

Le responsable de la tâche ETC était Volker Mohaupt (UBA). Le chef de projet de l'AEE était Ian Marnane. Les autres contributeurs sont Kaja Widmer (Swiss TPH), Anton Beloconi (Swiss TPH), Ian Marnane (EEA) et Penelope Vounatsou (Swiss TPH).

Résumé

La croissance continue de la population mondiale, associée à une tendance à l'urbanisation, au développement des infrastructures humaines et à la réduction des coûts d'éclairage, a entraîné une augmentation des émissions lumineuses anthropiques, en particulier dans les grandes villes. En conséquence, la diffusion nocturne de la lumière artificielle dans la basse atmosphère peut entraîner un éclaircissement constant du ciel nocturne et une absence constante d'obscurité dans les écosystèmes nocturnes environnants, ce qui est également connu sous le nom de pollution lumineuse. La prise de conscience croissante de la communauté scientifique quant aux effets négatifs de la lumière artificielle de nuit (Artificial-Light-At-Night abrégé en ALAN/LAN) sur la santé humaine, les processus écologiques et la visibilité céleste a conduit à la reconnaissance de la pollution lumineuse comme un problème environnemental global au sein de la société. La lumière artificielle de nuit étant abrégée en ALAN ou LAN dans la littérature publiée, ces deux acronymes sont utilisés de manière interchangeable dans le présent rapport. Étant donné que les processus biologiques d'espèces appartenant à différents taxons sont régulés par les régimes de lumière naturelle, les préoccupations relatives à l'exposition à l'ALAN sont liées à son potentiel à induire des réponses physiologiques atypiques entraînant des conséquences négatives pour la santé ou l'environnement. Ce rapport est une étude visant à évaluer les connaissances actuelles sur la pollution lumineuse dans les 38 États membres de l'Agence européenne pour l'environnement (AEE), y compris ceux qui font partie du plan d'action "Zéro pollution" de l'Union européenne (UE) (c.-à-d. l'UE-27).

Tout d'abord, les principaux impacts qu'ALAN peut avoir sur la santé humaine, la biodiversité et les écosystèmes sont résumés. La perturbation des habitudes de sommeil, le développement du cancer, les troubles dépressifs et la prise de poids, parmi les divers effets défavorables sur la santé étudiés, ont reçu la plus grande attention des scientifiques. Les effets néfastes sur la faune sont principalement liés à l'altération de l'horloge circadienne innée qui contrôle le comportement des animaux par le biais de signaux lumineux naturels. Il en résulte une altération des schémas comportementaux liés à la migration, à la reproduction ou à la communication, des changements d'activité tels que le décalage de l'émergence et le moment de la recherche de nourriture, et même une modification des caractéristiques physiologiques liées à la génétique, au métabolisme ou au développement. Les écosystèmes influencés négativement sont le ciel nocturne naturel ou les environnements sombres fonctionnant comme des sanctuaires pour les espèces sensibles à la lumière. Ce phénomène est en outre associé à une perturbation des interactions trophiques et à une diminution disproportionnée de la biodiversité en raison d'un déclin global de la connectivité des habitats.

Deuxièmement, une analyse des politiques locales dans les États membres de l'UE réglementant la pollution lumineuse a révélé qu'il n'existe actuellement aucune politique commune de l'UE. Toutefois, la France, la Croatie, la Slovénie et la République tchèque disposent d'un cadre juridique national avancé limitant les émissions lumineuses, tout comme certaines régions d'Italie ou d'Espagne. Certains pays de l'UE, comme l'Autriche, le Liechtenstein ou l'Irlande, ne disposent que de lignes directrices non contraignantes, mais n'ont pas de politique en vigueur. Au niveau mondial, il existe différentes stratégies politiques visant à atténuer la pollution lumineuse. Certaines politiques reposent sur des mesures strictes ou sont mises en œuvre par le biais d'une éducation parallèle des citoyens. D'autres ont été intégrées dans une loi existante ou formulées en étroite collaboration avec la communauté astronomique.

Troisièmement, les méthodes de surveillance des niveaux de pollution lumineuse sont présentées, en mettant l'accent sur le rôle des systèmes de télédétection. L'utilisation de l'imagerie satellitaire a permis de modéliser les tendances historiques en Europe et de comparer les niveaux de pollution lumineuse entre les pays de l'UE. Dans l'ensemble, la surface terrestre de l'Europe a connu une augmentation nette de l'exposition à la lumière anthropique, en particulier dans les régions orientales. Les changements des émissions lumineuses européennes ont été modélisés pour les deux seuils de $2 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$, auxquels on peut s'attendre à un impact écologique au moins faible, et de $0,5 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$, qui sont les émissions lumineuses les plus faibles mesurées par VIIRS. Alors que la zone exposée à des émissions lumineuses inférieures à $2 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ n'a diminué que de 1 %, les "espaces vraiment sombres",

exposés à une lumière artificielle inférieure à $0,5 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$, ont diminué de 5,2 % au cours des huit dernières années seulement. Même si $0,5 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ n'est pas un seuil généralement accepté pour un ciel vraiment sombre, cette limite a été arbitrairement choisie parce qu'elle reflète la luminance naturelle du ciel nocturne avec une marge d'incertitude. Alors que les Pays-Bas, le Luxembourg, la Pologne et la Belgique ont connu la plus forte augmentation de luminosité en comparant les périodes 2014/15 et 2020/21 pour les deux limites respectives, une réduction de la pollution lumineuse a été évidente pour l'Islande, l'Irlande et la France.

Enfin, une analyse des efforts de recherche actuels dans l'UE a montré que les publications les plus récentes se concentraient sur les trois sujets suivants : fonctionnement de l'écosystème et interactions trophiques, mise en œuvre socio-économique de la protection de l'obscurité et amélioration des méthodes de mesure. Au cours de nos recherches sur la pollution lumineuse, nous avons constaté que l'imagerie satellitaire dépendait fortement de la source lumineuse émettrice, de l'heure de la prise de vue, des conditions météorologiques, environnementales et astronomiques, ou du capteur de collecte. En outre, les preuves d'une forte association entre le statut socio-économique, l'urbanisation et l'exposition à la lumière donnent à penser que les études portant sur les effets de la pollution lumineuse sont susceptibles d'être perturbées par d'autres facteurs et doivent être analysées avec soin.

1 Introduction

La pollution lumineuse est généralement décrite comme une augmentation de la luminosité naturelle du ciel nocturne due à la lumière artificielle émise dans la couche inférieure de l'atmosphère (Bennie et al., 2015 ; Falchi et al., 2016). Certaines définitions soulignent la nature négative de ce phénomène en décrivant la pollution lumineuse comme une dégradation de l'obscurité, des émissions lumineuses excessives ou indésirables causées par un gaspillage d'énergie (Galloway et al., 2010 ; Hölker et al., 2010 ; Lapostolle & Challéat, 2021 ; Teikari, 2007). Les écologistes préoccupés par la détérioration des écosystèmes due à la pollution lumineuse suggèrent de faire une distinction entre la pollution lumineuse astronomique, qui est une diminution de la visibilité des objets célestes due à l'éclaircissement du ciel causé par les émissions de lumière artificielle, et la pollution lumineuse écologique, qui fait référence aux effets néfastes que subit la faune mondiale en raison des perturbations de l'environnement nocturne (Longcore & Rich, 2004). Les chercheurs qui étudient les effets négatifs de la lumière artificielle nocturne sur la santé humaine, la biodiversité ou les écosystèmes abrègent ce terme par ALAN ou LAN (Artificial-Light-At-Night). Ces acronymes sont donc utilisés de manière interchangeable dans le présent rapport. Étant donné qu'un grand nombre de processus physiologiques sont déclenchés par des stimuli lumineux naturels, les études examinant les effets de l'exposition à l'ALAN se concentrent principalement sur la possibilité d'induire des réponses inopportunes ou mal orientées entraînant des conséquences médicales ou écologiques néfastes (Sanders et al., 2021).

Les sources les plus importantes contribuant à la pollution lumineuse sont les lampadaires, les éclairages de sécurité éclairant les chantiers de construction ou les bâtiments commerciaux, les projecteurs utilisés pour les installations sportives ou sur les plates-formes pétrolières offshore et les éclairages publicitaires (Gaston et al., 2012). Cette menace environnementale plutôt moderne est particulièrement visuelle lorsque la somme de la lumière artificielle émise par une grande zone urbanisée persiste dans le ciel en raison de la réflexion de la luminance sur les gouttelettes d'eau dans les nuages, les molécules de gaz ou la poussière. Cette condition est appelée lueur artificielle et peut, dans des cas extrêmes, entraîner la formation d'un dôme lumineux au-dessus des agglomérations des pays industrialisés (Cinzano et al., 2000). Outre la lueur du ciel, il existe plusieurs formes de pollution lumineuse, notamment l'intrusion lumineuse, l'encombrement ou l'éblouissement. L'intrusion de la lumière est définie comme la lumière anthropogénique qui pénètre dans des zones où elle n'est pas voulue ou souhaitée. Elle est particulièrement préjudiciable dans les zones résidentielles lorsqu'elle est dirigée vers des maisons privées, ce qui perturbe les habitudes de sommeil des gens, ou dans les zones où se trouvent des espèces sauvages et des écosystèmes sensibles à la lumière. Les intrusions lumineuses sont souvent causées par l'éclairage public, les feux de circulation, les phares des véhicules, les éclairages intérieurs des bâtiments ou les panneaux publicitaires et peuvent constituer une nuisance constante pour les résidents (Schreuder, 1986). On parle d'encombrement lorsque la concentration d'appareils d'éclairage multiples dans une zone donnée est trop importante, ce qui entraîne un éclairage incohérent et excessif. C'est le cas lorsque le nombre et la conception des luminaires ont été progressivement ajoutés au fil du temps au lieu d'être correctement remplacés (IDA, 2014). L'éblouissement peut être expliqué par une lumière directe excessive qui provoque une gêne visuelle à laquelle les animaux et les humains réagissent en plissant les yeux. Il altère l'acuité visuelle, ce qui se traduit par une incapacité instantanée à distinguer les détails de ce qui se trouve dans le champ de vision de l'œil et peut même entraîner une cécité temporelle dans les cas extrêmes (Bullough et al., 2008). Dans l'ensemble, l'état du ciel est considéré comme pollué par la lumière si la luminosité naturelle est augmentée d'au moins dix pour cent (Falchi et al., 2016).

En raison de l'immense croissance de la population mondiale, du développement rapide des infrastructures humaines et de l'expansion urbaine, les niveaux de pollution lumineuse ont augmenté d'environ 20 % par an au cours de la seconde moitié du 20^e siècle (Hölker et al., 2010). Aujourd'hui, plus de 80 % de la population mondiale et plus de 99 % des habitants de l'Europe vivent sous un ciel pollué par la lumière. Plus d'un tiers de l'humanité, dont 60 % des Européens, sont incapables de voir la Voie lactée depuis leur domicile en raison de la lumière du ciel (Falchi et al., 2016). Alors que l'on estime que la superficie des environnements éclairés artificiellement augmente de 2,2 % par an, l'intensification annuelle de la pollution lumineuse dans les zones les plus peuplées atteint 6 % (Kyba et al., 2017).

L'augmentation de la luminosité est une tendance parallèle au développement économique mondial et a de multiples effets négatifs sur la santé humaine, la biodiversité et les écosystèmes naturels. Un sous-produit de l'expansion humaine est l'éclairage de nouvelles routes, de bâtiments commerciaux et de logements privés, qui s'accompagne d'une dispersion de la lumière dans les écosystèmes environnants (Bennie et al., 2015). La lumière artificielle est réfléchiée et dispersée par les aérosols dans l'atmosphère, ce qui fait que les lumières urbaines pénètrent dans les écosystèmes environnants, les paysages protégés et les zones rurales. L'éclairage des grands centres urbains est souvent visible à plus de 160 kilomètres de distance. En conséquence, 18,7 % de la surface terrestre est exposée à une luminosité nocturne classée comme polluée par la lumière (Longcore & Rich, 2004). L'éclairage artificiel n'est pas seulement une source de pollution, mais aussi un gaspillage de ressources en termes d'électricité et d'émissions de dioxyde de carbone contribuant au réchauffement de la planète. En raison d'installations d'éclairage mal conçues dans le monde entier, 30 % de la lumière artificielle est dirigée là où elle n'est pas censée l'être et n'est donc pas exploitée, ce qui représente une perte économique de près de 9 milliards de dollars par an (Gallaway et al., 2010). Au cours des deux dernières décennies, les publications scientifiques portant sur les effets de la pollution lumineuse ont été multipliées par dix, ce qui témoigne de l'inquiétude croissante et de l'intensification de ce problème (Rodrigo-Comino et al., 2021).

Les stratégies d'éclairage contemporaines sont de plus en plus souvent axées sur des systèmes à haut rendement énergétique et à faible émission de carbone, en réponse à la crise climatique actuelle. En conséquence, de nombreux pays passent des sources d'éclairage conventionnelles aux diodes électroluminescentes blanches (LED) qui ont une émission plus élevée de longueurs d'onde plus courtes produisant de la lumière dans la partie bleue du spectre (Gaston et al., 2012). Si cette source de lumière semble plus lumineuse et permet donc d'économiser d'importantes quantités d'énergie, elle a également un impact négatif sur la luminosité naturelle du ciel nocturne et risque de propager les effets écologiques néfastes de la pollution lumineuse bien au-delà des centres urbains (Chen, 2010). Les systèmes d'éclairage durable sont non seulement efficaces sur le plan énergétique, mais aussi rentables ; toutefois, à l'échelle mondiale, cela peut conduire à une augmentation de l'éclairage des zones qui étaient auparavant sombres, faiblement éclairées ou éclairées uniquement pendant une courte période en raison de restrictions financières (Kyba et al., 2017).

Dans le cadre de ce rapport, nous avons mené une étude visant à répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les principales incidences de la pollution lumineuse sur la santé humaine, la biodiversité et les écosystèmes ? Existe-t-il des évaluations quantitatives ou qualitatives mesurant l'importance de ces impacts ?
- Quelle est la base législative des États membres de l'UE ou d'autres pays progressistes pour surveiller et contrôler la pollution lumineuse ?
- Existe-t-il des normes et des méthodes de surveillance reconnues pour évaluer l'ampleur de la pollution lumineuse ?
- Existe-t-il des données montrant les tendances historiques de la pollution lumineuse au niveau d'un pays, de l'UE ou du monde ?
- Quelles sont les recherches actuellement menées en Europe sur la surveillance de la pollution lumineuse et de ses effets ?
- Quel rôle joue l'imagerie satellitaire dans l'évaluation de la pollution lumineuse ?
- Quelles sont les questions émergentes à prendre en compte lors d'une enquête sur la pollution lumineuse ?

2 Principaux effets de la pollution lumineuse

Étant donné que la physiologie et l'écologie de plusieurs espèces animales et de l'homme dépendent des signaux fournis par le cycle naturel jour-nuit ou les schémas saisonniers, les scientifiques s'inquiètent de ce qui peut se produire lorsque ces systèmes fonctionnels sont perturbés. Les preuves des effets néfastes de la pollution lumineuse se sont révélées pluridisciplinaires et concernent la santé humaine, la biodiversité mondiale et des écosystèmes entiers.

La plupart des connaissances sur l'impact d'ALAN sur la santé humaine proviennent d'études épidémiologiques qui comparent l'état de santé d'individus soumis à différentes expositions à la lumière. On peut distinguer quatre types d'études : les études de cohortes, les études de cas-témoins, les études expérimentales et les études animales. Dans les études de cohorte, différents paramètres de santé de grandes cohortes de population sont suivis sur de longues périodes, puis mis en correspondance avec des données satellitaires afin d'attribuer des niveaux de pollution lumineuse en fonction du lieu de résidence. Dans une étude cas-témoins, les participants sont sélectionnés sur la base de différents résultats de santé afin de comparer rétrospectivement divers facteurs de causalité susceptibles d'avoir conduit à l'affection. Les deux types d'études fournissent des preuves d'une association s'ils sont en mesure de montrer que les individus exposés à des niveaux plus élevés d'ALAN sont plus susceptibles d'être en moins bonne santé. Dans les expériences, les participants à l'étude présentant des caractéristiques similaires sont divisés au hasard en deux groupes, puis exposés à des conditions lumineuses différentes. Les changements physiologiques et écologiques immédiats, précédemment identifiés comme des facteurs contribuant au développement d'une maladie particulière, sont étudiés. Sur la base de ces résultats, il est possible de tirer des conclusions sur le développement d'un état de santé moins bon en fonction des niveaux d'exposition à la lumière. Des études similaires sont menées sur des animaux de différents taxons afin de mieux comprendre les éventuels effets négatifs de la pollution lumineuse sur l'homme. Diverses conséquences néfastes pour la santé humaine ont été étudiées, allant de la perturbation des habitudes de sommeil à l'augmentation des niveaux de stress et d'anxiété entraînant des changements hormonaux et métaboliques. Les scientifiques ont également tenté de déterminer si l'exposition à la lumière est un facteur causal dans des maladies graves telles que plusieurs types de cancer, les troubles dépressifs, l'athérosclérose ou la maladie d'Alzheimer.

Les effets négatifs sur la faune ont été principalement étudiés en relation avec l'altération du système circadien fonctionnant comme une horloge interne qui guide le comportement naturel de différents groupes d'espèces. Ces effets ont également été associés à des changements comportementaux tels que la migration, la recherche de nourriture et la reproduction, ou à des altérations physiologiques liées à la génétique, au métabolisme ou à des troubles du développement. Les écologistes ont pu fournir des preuves de la perturbation des interactions prédateur-proie, de la dynamique des populations et de la réduction de la capacité de survie liées à la pollution lumineuse.

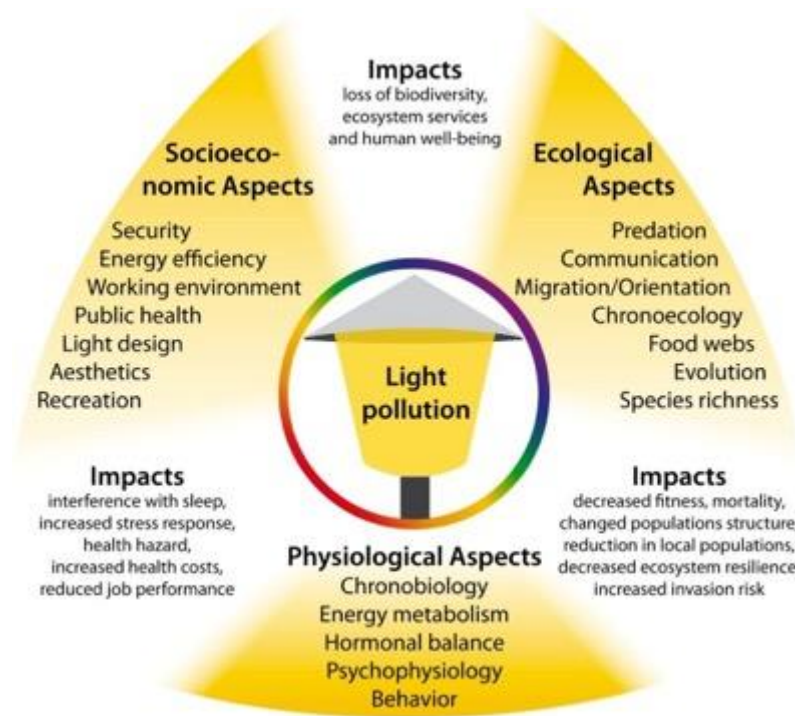
Les écosystèmes les plus touchés par la pollution lumineuse sont, d'une part, le ciel nocturne naturel et ses objets célestes et, d'autre part, les environnements sombres où la lumière est généralement absente. Cependant, tout écosystème situé à proximité d'une zone très éclairée est soumis à l'influence de la lumière diffuse et peut donc en subir les effets néfastes.

Ces domaines de recherche sont étroitement liés et ne peuvent donc pas être analysés séparément. Les principaux impacts de la pollution lumineuse, tant en ce qui concerne l'intensité lumineuse que les spectres de couleur, apparaissent à l'interface entre les différents aspects physiologiques, écologiques et socio-économiques (figure 2.1, Hölker et al., 2010).

Questions à examiner :

- (1) Quelles sont les caractéristiques de la lumière qui perturbent la santé humaine et les communautés écologiques ?
- (2) Comment la pollution lumineuse interagit-elle avec d'autres facteurs de stress tels que la pollution de l'air, de l'eau et du bruit ?
- (3) Quel rôle la pollution lumineuse joue-t-elle dans le changement climatique en cours ?

Figure 2.1 : Interaction des impacts négatifs liés à la pollution lumineuse à l'interface de l'écologie, de la socio-économie et de la physiologie



Source : D'après Hölker et al. 2010.

2.1 Santé humaine

Le corps humain s'est adapté à un rythme jour-nuit naturellement régulé bien avant l'invention des systèmes d'éclairage artificiel. L'étude des relations entre l'exposition aux ALAN et les effets potentiels sur la santé a donc débuté en raison de la crainte que les mécanismes physiques, mentaux et comportementaux qui suivent ce rythme circadien ne soient perturbés (Chepesiuk, 2009).

2.1.1 Synthèse de la littérature

Nous avons effectué une recherche documentaire de janvier à mars 2022 sur PubMed. En appliquant les termes de recherche (pollution lumineuse OU exposition à la lumière) ET (santé), un total de 1 361 articles publiés a été trouvé. Un échantillon représentatif de la littérature a été sélectionné pour illustrer les principales conclusions (résumées dans le tableau 1). Seuls les articles évalués par des pairs, rédigés en anglais et publiés dans des revues scientifiques ayant un facteur d'impact supérieur à deux entre 2000 et 2022 ont été pris en compte. La recherche actuelle se concentre principalement sur quatre voies potentielles par lesquelles la pollution lumineuse peut être délétère pour la santé humaine : le cancer, les troubles du sommeil, la dépression et l'obésité. Par conséquent, les études sélectionnées visent à donner un aperçu de la variété des modèles d'étude utilisés pour étudier ces associations en particulier et à mettre en évidence les difficultés potentielles liées aux facteurs de confusion. En outre, un nombre élevé de pays de publication a été ciblé afin de minimiser l'influence des caractéristiques propres à la population.

Tableau 2.1 : Aperçu des études sur les effets de la pollution lumineuse sur la santé

Référence	Pays	Conception de l'étude	Résultats	Principaux résultats	Méthode
(Kliukiene et al., 2001)	Norvège	Étude de cohorte	Cancer du sein	Le risque de cancer du sein chez les femmes totalement aveugles était de 0,64 (IC 95 % = 0,21-1,49) et chez celles devenues aveugles avant l'âge de 65 ans de 0,51 (IC 95 % = 0,11-1,49).	15736 femmes norvégiennes issues du Registre norvégien de la cécité ont participé, 5 catégories différentes de déficience visuelle ont été attribuées, l'état de santé a été suivi tout au long de la vie.
(Lamphar et al., 2022)	Slovaquie	Étude de cas et de contrôle	Cancer du sein	Association positive entre l'augmentation de la pollution lumineuse et le cancer du sein, augmentation moyenne de 10,9 cas de cancer du sein pour 100 000 habitants-année. (95 % CI = 7,0-14,8)	Incidents de cancer évalués pour les zones rurales par rapport aux zones urbaines (25025 cas de cancer du sein, 16119 cas de cancer de la prostate), niveau de pollution lumineuse évalué sur la base de l'éclairage nocturne mondial par satellite. Collections (1999-2012)
(Parent et al., 2012)	Canada	Étude de cas et de contrôle	Divers types de cancer	Le cancer était associé au travail de nuit : cancer du poumon (OR = 1,76, 95 % CI = 1,25-2,47), cancer du côlon (OR = 2,03, 95 % CI = 1,43-2,89), pour le cancer de la vessie (OR = 1,74, 95 % CI = 1,22-2,49), pour le cancer de la prostate (OR = 2,77, 95 % CI = 1,96-3,92), pour le cancer du rectum (OR = 2,09, IC 95 % = 1,40-3,14), pour le cancer du pancréas (OR = 2,27, IC 95 % = 1,24-4,15), pour les lymphomes (OR = 2,31, 95 % CI = 1,48-3,61)	3137 hommes (512 témoins) ayant eu un cancer ont participé (1979-1985), les antécédents professionnels et les heures de travail ont été demandés, les longues heures de travail de nuit étant associées à des niveaux plus élevés d'exposition à la lumière.
(Bauer et al., 2013)	Géorgie	Étude de cas et de contrôle	Cancer du sein	L'incidence globale du cancer du sein était associée à une forte exposition à la lumière nocturne (OR = 1,12, 95 % CI (1,04-1,20)).	34053 patients atteints de cancer du sein (cas) & 14458 patients atteints de cancer du poumon (contrôle) à partir des données du Georgia Comprehensive Cancer Registry (2000-2007) ont participé, les niveaux de lumière nocturne ont été estimés sur la base des images satellites DMSP-OLS Nighttime Light Time Series (1992-2007), l'exposition à la lumière a été extraite pour chaque année précédant le diagnostic du cas/témoin.

Référence	Pays	Conception de l'étude	Résultats	Principaux résultats	Méthode
(Cho et al., 2013)	Corée	Étude expérimentale	Troubles du sommeil	L'exposition à la lumière pendant la nuit a augmenté le stade 1 du sommeil ($p < 0,05$), diminué la proportion de sommeil à ondes lentes ($p < 0,001$), diminué les paramètres de maintien du sommeil ($p < 0,1$) et augmenté le nombre d'éveils par heure ($p < 0,01$).	10 dormeurs sains ont participé (groupes : lumière allumée vs. lumière éteinte), 2 sessions de polysomnographie (PSG), qualité du sommeil mesurée avec les mouvements oculaires rapides, époques de sommeil REM/non-REM.
(Patel, 2019)	ÉTATS-UNIS	Étude transversale	Privation de sommeil	Par augmentation de 10 unités de la lumière nocturne (nW/cm ² /sr), la durée du sommeil diminue de 5,59 minutes par jour, la probabilité de déclarer un sommeil insuffisant (< 7 heures) augmente au niveau de la MMSA (13,77 %) et au niveau du comté (2,19 %).	282 403 auto-déclarations d'heures de sommeil et de sommeil insuffisant provenant du Behavioral Risk Factor Surveillance System des zones statistiques métropolitaines et micropolitaines de 2014 et 2016 et de la prévalence du sommeil insuffisant en 2014 dans 2 823 comtés américains provenant du County Health Rankings, associées à des données sur la lumière artificielle nocturne provenant du Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (National Oceanic and Atmospheric Administration US).
(Esaki et al., 2019)	Japon	Étude expérimentale	Un sommeil de moins bonne qualité	Les paramètres du sommeil obtenus par actigraphie ont montré une efficacité du sommeil significativement plus faible (80,1 % contre 83,4 %, $p = 0,01$), une latence d'endormissement log-transformée plus longue (2,9 contre 2,6 min, $p = 0,01$) et un réveil plus important après l'endormissement (51,4 contre 41,6 min, $p = 0,02$) dans le groupe "lumière" que dans le groupe "obscurité".	175 patients ambulatoires souffrant de troubles bipolaires ont participé (groupes : lumière - >5 lux vs. obscurité - <5 lux), l'intensité moyenne de la lumière locale dans la chambre à coucher a été mesurée à l'aide d'un photomètre portable pendant 7 nuits, les paramètres du sommeil ont été évalués à l'aide de l'indice de sévérité de l'insomnie, ajustement pour les variables confusionnelles.
(Viola et al., 2008)	Angleterre	Étude expérimentale	Diminution de la qualité du sommeil et de la durée de la concentration	Comparée à la lumière blanche (4 000 K), la lumière blanche enrichie en bleu (17 000 K) a amélioré les mesures subjectives de la vigilance ($p < 0,0001$), de l'humeur positive ($p = 0,0001$), de la performance ($p < 0,0001$), de la fatigue du soir ($p = 0,0001$), de l'irritabilité ($p = 0,004$), de la concentration ($p < 0,0001$) et de l'inconfort oculaire ($p = 0,002$). La somnolence diurne a été réduite ($p = 0,0001$) et la qualité du sommeil nocturne subjectif ($p = 0,016$) a été améliorée sous lumière blanche enrichie en bleu	Les participants ont été exposés à deux nouvelles conditions d'éclairage, chacune durant 4 semaines (lumière blanche enrichie en bleu - 17 000 K, lumière blanche 4 000 K). Des questionnaires ultérieurs ont permis d'évaluer la vigilance, l'humeur, la qualité du sommeil, les performances, l'effort mental, les maux de tête et la fatigue oculaire, ainsi que l'humeur tout au long de l'intervention de 8 semaines

Référence	Pays	Conception de l'étude	Résultats	Principaux résultats	Méthode
(Harb et al., 2015)	ÉTATS-UNIS	Étude de cohorte	Troubles psychiques, symptômes dépressifs, Mauvaise qualité du sommeil	Les taux de cortisol ($p = 0,008$, "sans fenêtre" = 3,10-4,92, "avec fenêtre" = 2,80-3,40) et de mélatonine ($p = 0,009$, "sans fenêtre" = 2,94-4,14, "avec fenêtre" = 20,52-28,96) étaient significativement différents entre les groupes, des taux de cortisol plus élevés étaient positivement corrélés avec des troubles psychiatriques mineurs et des symptômes dépressifs, des taux de mélatonine plus faibles étaient corrélés avec des symptômes dépressifs et une mauvaise qualité de sommeil	20 employés ont participé (groupes : "avec fenêtre" vs. "sans fenêtre"), activité et exposition à la lumière ambiante mesurées avec Actiwatch pendant 7 jours, concentration de mélatonine et de cortisol mesurée à partir de la salive, quantification des troubles psychiatriques sur la base de questionnaires, symptômes de dépression sur la base de l'échelle de Montgomery-Asberg, qualité du sommeil sur la base de l'indice de qualité du sommeil de Pittsburgh.
(Cissé et al., 2017)	ÉTATS-UNIS	Expériences animales	Comportement dépressif (inhérent)	L'exposition chronique des parents à la lumière pendant la nuit a un effet multigénérationnel sur le comportement dépressif de la progéniture, l'éclairage parental modifie la consommation de saccharose de la progéniture ($p < 0,05$), la progéniture "dim" augmente le temps de flottement ($p < 0,05$), l'exposition maternelle diminue l'expression de GR dans l'hippocampe ($p < 0,01$)	Hamsters sibériens adultes (<i>Phodopus sungorus</i>) exposés à la lumière la nuit pendant 9 semaines (groupes : obscurité - 0 lux vs. obscurité - 5 lux), mâles et femelles appariés dans un plan factoriel complet et progéniture en gestation, testés à l'âge adulte pour l'expression hippocampique des glucocorticoïdes (GR), pour l'expression des récepteurs de la mélatonine (MT1), pour le temps passé à flotter dans le test de natation de Porsolt
(Min & Min, 2018)	Corée	Étude transversale	Symptômes dépressifs, comportement suicidaire	Par rapport aux adultes vivant dans les zones les moins exposées à la lumière extérieure la nuit, ceux vivant dans les zones les plus exposées avaient une probabilité plus élevée de symptômes dépressifs (OR = 1,29, 95 % CI = 1,15-1,46) ou de comportements suicidaires (OR = 1,27, 95 % CI = 1,16-1,39)	Des habitants coréens ($n = 113\ 119$ pour les symptômes dépressifs, $n = 152\ 159$ pour le comportement suicidaire) ont participé, le réseau local extérieur a été estimé à l'aide de données satellitaires provenant des National Centers for Environmental Information, la dépression a été quantifiée sur la base de l'échelle de dépression, le comportement suicidaire a été défini comme l'expérience d'idées suicidaires ou de tentatives de suicide

Référence	Pays	Conception de l'étude	Résultats	Principaux résultats	Méthode
(Rybnikova et al., 2016)	Israël	Étude transversale	Masse corporelle élevée, obésité	La lumière artificielle pendant la nuit est un facteur prédictif positif statistiquement significatif du surpoids et de l'obésité ($p < 0,05$)	Images satellites de l'éclairage nocturne (US Defense Meteorological Satellite Program) combinées à des données nationales sur les taux de prévalence du surpoids et de l'obésité chez les femmes et les hommes (rapportés par l'OMS), ajustement pour les variables confusionnelles
(Fonken et al., 2010)	Israël	Expériences animales	Masse corporelle élevée, obésité	Les souris hébergées en cycle lumineux ont augmenté leur masse corporelle et réduit leur tolérance au glucose de manière significative par rapport aux souris hébergées en cycle obscur. La consommation de nourriture des souris en cycle lumineux était de 55,5 % contre 36,5 % en cycle obscur	30 souris Swiss-Webster mâles exposées à différents cycles lumière/obscurité (groupes : cycle lumineux 16:8 vs. cycle sombre 12:12), les facteurs contribuant à l'obésité ont été mesurés
(Obayashi et al., 2019)	Japon	Étude de cohorte	Athérosclérose carotidienne	Le groupe situé dans le quartile le plus élevé d'exposition à la lumière pendant la nuit a présenté une augmentation significative de l'épaisseur moyenne de l'intima-média de l'artère carotide (0,028, 95 % CI = 0,0050,052, $p = 0,019$), par rapport au groupe le moins exposé à la lumière pendant la nuit, relation entre la lumière pendant la nuit et l'épaisseur maximale de l'intima-média de l'artère carotide (0,083, 95 % CI = 0,037-0,129, $p < 0,001$)	989 personnes âgées ont participé, l'intensité moyenne de la lumière pendant la nuit a été évaluée (4 groupes), l'épaisseur de l'intima-média (IMT) de l'artère carotide a été mesurée comme indicateur du risque d'athérosclérose carotidienne, ajustement pour les variables confusionnelles
(M. Kim et al., 2018)	Corée	Expériences animales	Maladie d'Alzheimer	La durée de vie des mouches soumises à une lumière faible était significativement inférieure à celle des mouches soumises à une lumière sombre ($p < 0,001$), les mouches surexprimant des protéines spécifiques dans les neurones ont une durée de vie significativement plus courte que les témoins ($p < 0,001$), des rythmes circadiens perturbés, des cycles veille-sommeil altérés en raison de l'augmentation des protéines et de la neurodégénérescence	Mouches drosophiles exposées à une lumière faible pendant la nuit (groupes : lumière faible - 10 lux vs. obscurité - 0 lux) pendant 3 jours, agrégation des protéines tau phosphorylées dans le cerveau, dérèglement de la locomotion, augmentation des défauts de mémoire mesurés comme indicateur de risque de la maladie d'Alzheimer

La voie par laquelle les personnes exposées à des quantités accrues de lumière artificielle peuvent développer un cancer repose sur la preuve que les neurotransmetteurs situés dans l'hypothalamus du cerveau réagissent souvent à la stimulation lumineuse, ce qui peut entraîner la libération de quantités plus élevées ou plus faibles d'hormones sélectionnées (Keshet-Sitton et al., 2016 ; Weiler et al., 1997). Par exemple, le noyau suprachiasmatique (SCN) dans le cerveau est un système photoréceptif. Cela signifie qu'il est contrôlé par la lumière perçue par la rétine de l'œil. Les cellules ganglionnaires rétiniennes intrinsèquement photosensibles (ipRGCs) sont donc les photorécepteurs les plus importants qui régulent l'horloge interne et, par conséquent, les niveaux d'hormones. Des études ont montré que la libération de mélanopsine varie en fonction de l'exposition à la lumière et de la durée de la photopériode. La stimulation des ipRGCs est la plus forte lorsqu'ils sont exposés à une lumière d'une longueur d'onde de 470 à 480 nm (gamme bleue), ce qui entraîne une suppression de la production de mélanopsine. Cependant, ce photo pigment est essentiel pour la biosynthèse de la mélatonine pinéale, qui peut par conséquent être régulée à la baisse en raison d'ALAN (Paul et al., 2009). Cette hormone joue un rôle important pour le système immunitaire, notamment dans le processus de détoxification des radicaux et la protection contre l'inflammation. Dans la progression de la maladie cancéreuse, la mélatonine atténue les métastases et la croissance tumorale et peut modérer les effets indésirables de la chimiothérapie et de la radiothérapie. Une réponse immunitaire efficace peut être empêchée par une perturbation de la production naturelle de mélatonine en raison d'un cycle veille-sommeil perturbé par ALAN (Moradkhani et al., 2019). Étant donné que la mélatonine joue un rôle particulièrement important dans la progression du cancer du sein (CIRC, 2020), un modèle d'étude courant consiste à étudier le lien avec la pollution lumineuse en comparant la distribution des incidences avec celle d'un autre type de cancer qui devrait être distribué au hasard dans la population (Bauer et al., 2013 ; Lamphar et al., 2022). Les taux de cancer étaient également élevés chez les personnes travaillant par roulement, qui sont plus souvent éveillées la nuit et donc sujettes à une perturbation du cycle circadien. L'exposition excessive à la lumière a surtout été associée à un risque accru de cancer du sein et du côlon, mais un lien avec le cancer du pancréas, du rectum, du lymphome ou du rein a également été étudié (Parent et al., 2012). D'autres hormones régulées par l'horloge circadienne sont l'œstrogène, la progestérone ou la dopamine, qui peuvent avoir des conséquences cliniques similaires si elles ne sont pas libérées en quantités régulières (Liu et al., 2020).

Même de faibles quantités d'ALAN peuvent perturber la partie du cerveau responsable du cycle veille-sommeil, à savoir le SCN situé dans l'hypothalamus. En conséquence, la LAN a été associée à une diminution de la qualité du sommeil, quantifiée par une augmentation des phases d'éveil, une augmentation de l'activité cérébrale, un sommeil superficiel ou un retard de l'endormissement (Cho et al., 2013). Dans certaines études, les participants ont été exposés expérimentalement à différentes intensités de LAN, tandis que dans d'autres, les niveaux d'exposition à la lumière ont été assignés géographiquement grâce à l'imagerie satellitaire (Esaki et al., 2019 ; Patel, 2019). Étant donné que les influences sur le système circadien varient en fonction de l'exposition à la lumière de différentes longueurs d'onde, ce facteur est également pris en compte dans les études expérimentales concernant les habitudes de sommeil. Il a été démontré que la lumière blanche enrichie en lumière bleue pouvait améliorer la qualité du sommeil, les performances et la capacité de concentration (Viola et al., 2008).

Par exemple, l'ALAN était également lié à un comportement de type dépressif ou suicidaire. Là encore, il a été constaté que les perturbations circadiennes affectaient négativement les mécanismes des régions du cerveau responsables du bien-être émotionnel (Bedrosian et al., 2016). Des études expérimentales menées sur des rongeurs ont montré que l'expression des gènes dans l'hippocampe pouvait être modifiée sous l'influence de la lumière électrique, ce qui entraînait des changements de comportement (Cissé et al., 2017 ; Fonken & Nelson, 2013). Ces résultats ont été confirmés par des études transversales et de cohorte qui ont mis en évidence des disparités entre l'auto déclaration des symptômes dépressifs de groupes de population soumis à différents niveaux d'émissions lumineuses (Harb et al., 2015 ; Min & Min, 2018). Certains chercheurs ont même pu établir un lien entre des troubles mentaux avancés comme la maladie d'Alzheimer ou l'athérosclérose en montrant expérimentalement comment les marqueurs subcliniques s'aggravaient en raison de niveaux élevés d'exposition à la lumière (Kim et al., 2018 ;

Obayashi et al., 2019).

Les tendances mondiales suggèrent une évolution superposée des taux d'obésité et de la pollution lumineuse, ce qui a été démontré dans des modèles géoréférencés s'appuyant sur des données de télédétection (Rybnikova et al., 2016). Cette association a été expliquée par différents mécanismes : de faibles niveaux de mélatonine, une tolérance réduite au glucose, un rythme circadien perturbé, des habitudes alimentaires perturbées. Une augmentation de l'indice de masse corporelle a également été signalée chez des souris exposées à des niveaux anormalement élevés de lumière électrique et liée à des changements comportementaux et physiologiques chez les animaux (Fonken et al., 2010).

2.1.2 Évaluation critique

Encadré 2.1 : Peut-on quantifier les effets néfastes de la pollution lumineuse sur la santé ?

Les conclusions tirées des études scientifiques doivent être soigneusement analysées afin de quantifier avec précision les effets sur la santé d'une exposition excessive à la lumière. Les limites et lacunes suivantes ont été identifiées :

Limites

Tout d'abord, les études qui s'appuient sur des données de télédétection peuvent établir une corrélation entre l'état de santé et l'exposition à la lumière. Cependant, la luminosité est souvent utilisée comme un indicateur du niveau d'urbanisation, qui peut être associé à un certain nombre de facteurs socio-économiques tels que le revenu mensuel, la qualité de l'alimentation, les installations sanitaires, les niveaux de pollution de l'air, etc. Pour cette raison, il est impossible de dire avec certitude si ALAN est le facteur causal qui a conduit à une moins bonne santé ou si l'une ou même une combinaison d'autres variables est responsable, lorsque l'on se base uniquement sur des données satellitaires (Lamphar et al., 2022 ; Patel, 2019 ; Rybnikova et al., 2016). Une étude sur la justice environnementale menée aux États-Unis a révélé que le statut socio-économique est fortement lié à l'exposition à la lumière artificielle. En moyenne, les quartiers majoritairement habités par des Américains blancs étaient deux fois moins exposés à la pollution lumineuse que les quartiers habités par des communautés noires, asiatiques ou hispaniques socialement défavorisées (Nadybal et al., 2020). Ces variables confusionnelles doivent également être prises en compte dans les études portant sur un seul groupe de population spécifique (par exemple, les infirmières, les travailleurs postés, les hôtesses de l'air, les ouvriers d'usine). Même s'il peut être raisonnable de supposer que la perturbation du système circadien est plus problématique dans certains environnements de travail que dans d'autres, les problèmes de santé potentiels qui s'accumulent dans ces groupes peuvent ne pas être inévitablement causés par l'exposition excessive à la LAN. Plusieurs facteurs liés au lieu de travail peuvent exercer une pression sur la santé et ne peuvent donc pas être expliqués par la seule pollution lumineuse.

Deuxièmement, les expériences d'exposition à la lumière sont souvent menées sur des animaux et les résultats sont ensuite transposés à l'homme. Dans ce cas, il est essentiel de connaître les différences physiologiques. D'une part, il est légitime de supposer qu'un changement moléculaire dans le tissu neurologique ou une altération de l'expression génétique due à une exposition excessive à la lumière artificielle peut également concerner les humains s'il a été observé chez les animaux (Bedrosian et al., 2016 ; Fonken & Nelson, 2013). D'autre part, nous devons être prudents lorsque nous déduisons les découvertes de changements comportementaux chez les animaux pour les appliquer à l'homme. Alors qu'une souris pourrait ne pas être en mesure d'adapter son comportement alimentaire parce qu'elle ne sait pas que la luminosité n'est pas nécessairement équivalente à la lumière du jour, un être humain pourrait en être capable (Fonken et al., 2010).

Troisièmement, le résultat d'une étude sur la pollution lumineuse dépend fortement de la méthode de mesure utilisée pour quantifier l'exposition à la lumière au niveau individuel. De nombreuses approches utilisées pour évaluer l'exposition à la lumière sont limitées dans le temps et dans l'espace, ce qui peut conduire à une classification erronée. Il s'agit d'une limitation courante des études reposant sur des mesures à grande échelle géographique, telles que l'imagerie satellitaire, ou des études reposant sur des auto-évaluations à l'aide de questionnaires. Des relations exposition-réponse inexactes peuvent également être établies si les expositions historiques à la lumière sont négligées lors de l'étude d'un résultat sanitaire spécifique (Jones 2020).

Enfin, il est crucial que les sources de lumière naturelle et artificielle soient analysées séparément lorsque l'on s'intéresse à l'effet de la pollution lumineuse, car elles diffèrent grandement en termes de caractéristiques telles que la composition spectrale et le moment de l'exposition (Harb et al., 2015 ; Parrado et al., 2019).

L'évaluation

Dans l'ensemble, la littérature fournit des preuves de la manière dont une exposition excessive aux ALAN peut entraîner un risque accru de cancer. Des études de cohorte et diverses études cas-témoins ont reproduit les mêmes résultats, qui ont été expliqués par une voie physiologique compréhensible et sensée (Bauer et al., 2013 ; Keshet-Sitton et al., 2016 ; Kliukiene et al., 2001 ; Parent et al., 2012). De même, il a été démontré que l'exposition au LAN diminuait la qualité du sommeil, ce qui pourrait même entraîner d'autres problèmes de santé tels que des troubles chroniques du sommeil (Cho et al., 2013 ; Esaki et al., 2019 ; Suh et al., 2018 ; Viola et al., 2008).

Les expériences sur les animaux et les études épidémiologiques basées sur l'auto-déclaration suggèrent une association entre la pollution lumineuse et les symptômes dépressifs. La question de savoir s'il s'agit d'un effet indirect d'ALAN susceptible d'augmenter l'incidence d'un sommeil perturbé doit être étudiée plus avant (Bedrosian et al., 2016 ; Fonken & Nelson, 2013). Les preuves de l'association entre la pollution lumineuse et l'augmentation de la masse corporelle, voire l'obésité, manquent de spécificité, ce qui signifie qu'il peut y avoir une corrélation, mais que nous ne pouvons pas en déduire la causalité. Étant donné que la plupart des études portant sur l'association entre la pollution lumineuse et le surpoids s'appuient sur l'imagerie satellitaire et que seules quelques études animales ont pu reproduire ces résultats, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour corriger les facteurs de confusion et tirer des conclusions définitives. Les données de télédétection permettent d'estimer l'exposition à la lumière artificielle sur une vaste échelle géographique, mais leur capacité à fournir des données sur l'exposition au niveau individuel est limitée.

Alors que l'étude de cohorte portant sur une relation entre la pollution lumineuse et l'athérosclérose a fourni des résultats plausibles, le développement éffréné de la maladie d'Alzheimer vraisemblablement causé par l'exposition à l'ALAN testée expérimentalement sur des mouches et la transférabilité de ces résultats à la physiologie humaine devraient faire l'objet de recherches plus approfondies (Obayashi et al., 2019 ; Kim et al., 2018).

Lacunes dans les connaissances

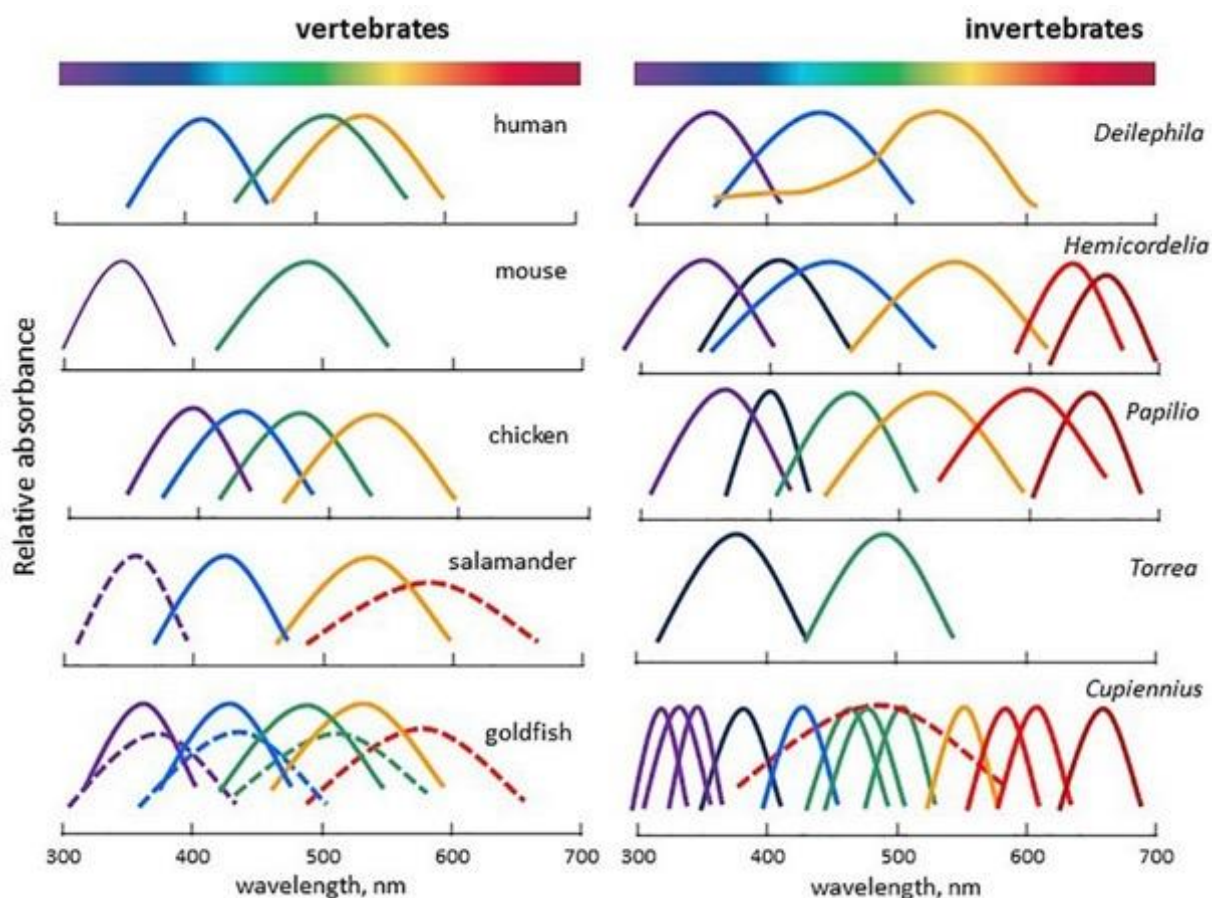
En conclusion, de nombreuses études préconisent qu'une exposition excessive à ALAN est susceptible d'entraîner un risque accru de cancer ou de troubles du sommeil. Pour en déduire une relation de cause à effet avec la dépression et l'obésité, il faudrait mener davantage d'études avec des modèles différents afin de renforcer les preuves trouvées. Il y a des raisons de penser que la pollution lumineuse peut également jouer un rôle dans des maladies telles que l'athérosclérose et la maladie d'Alzheimer, ce qui devra faire l'objet d'une étude plus approfondie. Pour déterminer correctement les risques sanitaires associés à la pollution lumineuse et élucider davantage les incertitudes potentielles concernant le cancer, des études supplémentaires devraient être menées au niveau individuel sur des périodes plus longues et à de petites échelles géographiques, de préférence en incluant des estimations rétrospectives de l'exposition (Jones, 2020).

2.2 Biodiversité

Les espèces de plusieurs taxons dépendent d'un cycle naturel jour-nuit, de sorte que les rencontres cumulées avec des sources de lumière artificielle perturbant ce rythme peuvent altérer leur comportement, leur activité et leur physiologie. Les espèces particulièrement touchées par les perturbations lumineuses sont celles qui sont affectées par des stimuli saisonniers liés à la longueur du jour ou les espèces nocturnes, les effets négatifs sur les animaux actifs la nuit étant alors plus prononcés (Sanders et al., 2021). Cela peut s'expliquer par le fait que les systèmes d'éclairage utilisés pour éclairer les zones urbaines sont adaptés aux yeux diurnes de l'homme. Or, les organismes nocturnes ont des yeux adaptés à l'obscurité qui perçoivent ces sources lumineuses comme beaucoup plus brillantes. Au niveau mondial, 30 % des vertébrés et 60 % des invertébrés sont nocturnes et appartiennent donc à un groupe d'espèces qui souffre énormément de l'influence de la pollution lumineuse (Hölker et al., 2010). Par rapport à l'homme, la plupart des animaux perçoivent des longueurs d'onde différentes, ce qui rend difficile la caractérisation de l'impact des émissions lumineuses

excessives sur la faune. Si certains animaux ne voient pas les grandes longueurs d'onde (rouge ou jaune) que nous percevons, d'autres sont capables de détecter des longueurs d'onde plus courtes (blanc ou bleu) au-delà de la partie bleu-violet du spectre, jusque dans la zone ultraviolette. Ces derniers sont particulièrement sensibles aux LED (diodes électroluminescentes) qui émettent principalement de la lumière blanche et bleue et qui ont gagné en importance au cours des dernières décennies en raison de leur efficacité énergétique (Commonwealth of Australie, 2020). La figure 2.2 illustre différents groupes d'espèces et leur sensibilité à des longueurs d'onde spécifiques du spectre par rapport à ce que l'œil humain perçoit.

Figure 2.2 : Perception spectrale des espèces de différents taxons



Note : courbes de sensibilité spectrale de certains représentants des vertébrés et des invertébrés, illustrant la grande variété des systèmes de détection de la lumière rencontrés. **Vertébrés** : homme *Homo sapiens*, souris *Mus musculus*, poulet *Gallus domesticus*, salamandre *Salamandra*, poisson rouge *Carassius auratus*. **Invertébrés** : papillon de nuit *Deilephila elenor*, libellule *Hemicordulia tau*, papillon *Papilio Xuthus*, ver annélide *candida*, araignée nocturne *Cupiennius salei*.

Source : Reproduit de Falcón et al, 2020.

En lien avec la pollution lumineuse, les écologistes ont trouvé des preuves de l'altération des schémas de migration, des stratégies de recherche de nourriture, des habitudes de reproduction ou des systèmes de communication, ce qui a été associé à une augmentation de la mortalité et à une modification des structures des communautés. En conséquence, un éclairage artificiel excessif a un impact négatif sur la biodiversité mondiale et joue un rôle important dans la modification des interactions écologiques (Sanders et al., 2021).

2.2.1 Changements de comportement

La désorientation menace la migration et la survie

L'éclairage artificiel peut altérer les capacités de navigation d'espèces appartenant à différents taxons.

Un exemple courant est celui des tortues de mer nouveau-nées, qui ont du mal à trouver l'océan lorsqu'elles émergent sur la plage après l'éclosion. En général, leur instinct inné les éloigne des constructions sombres telles que les dunes ou la végétation sur le rivage. De nos jours, de nombreuses plages sont éclairées artificiellement, ce qui donne aux nouveau-nés un signal contradictoire les guidant vers la terre. En raison de la déshydratation, de l'épuisement ou d'une prédation accrue sur la terre ferme, les taux de survie peuvent diminuer (Witherington & Martin, 2003).

Les oiseaux migrateurs nocturnes constituent un autre groupe d'espèces dont le sens de l'orientation est entravé par la lumière artificielle la nuit. Une fois de plus, cela peut entraîner une perte importante de leurs réserves d'énergie et une augmentation de leur mortalité. Diverses espèces d'oiseaux s'orientent en utilisant deux systèmes de navigation : d'une part, les objets célestes dans le ciel nocturne et, d'autre part, une boussole intérieure qui dépend du champ magnétique global. Le premier outil de navigation devient inefficace lorsque le ciel nocturne s'éclaircit et que la visibilité de la lune et des étoiles se dégrade. Ce phénomène est particulièrement présent en mer du Nord ou dans le nord du golfe du Mexique, où les plateformes pétrolières sont intensément éclairées par des projecteurs pour les opérations nocturnes. De nombreux oiseaux nocturnes sont attirés par ces grandes sources lumineuses et sont désorientés. Le second mécanisme d'orientation peut également être altéré par l'éclairage artificiel, car la boussole magnétique d'un oiseau est conditionnée par la longueur d'onde. Des études expérimentales ont montré que la lumière contenant peu ou pas de longueurs d'onde visibles est utilisée pour l'orientation de la boussole magnétique. Par conséquent, les sources lumineuses émettant les parties blanche, bleue ou verte du spectre n'ont pas d'impact significatif sur le sens de l'orientation des oiseaux, alors que la lumière rouge interfère avec leur boussole interne et peut leur faire perdre leurs routes migratoires (Poot et al., 2008). Une autre source liée à la lumière qui augmente les taux de mortalité de plusieurs espèces d'oiseaux est la réflexion des lumières des villes sur les grandes constructions. Souvent, les oiseaux ne perçoivent pas les bâtiments commerciaux ou les chantiers de construction comme des barrières et sont attirés par la lumière réfléchi, ce qui peut entraîner des collisions fatales (Lao et al., 2020).

Lors de l'étude des effets néfastes de la lumière anthropique sur les insectes, la plupart des recherches ont porté sur l'augmentation des taux de mortalité due à leur attraction par les installations d'éclairage. De nombreux groupes d'insectes présentent une forme de comportement de fuite vers la lumière, où deux scénarios sont la cause la plus probable de la mort. Soit les individus volent directement dans la lampe et meurent en raison de la température élevée, soit, comme cela est plus souvent observé, les insectes tournent autour de la source lumineuse pendant une durée illimitée jusqu'à ce qu'ils soient attaqués par des prédateurs ou qu'ils meurent d'épuisement (Eisenbeis & Hänel, 2009). Il a été démontré que les taux de mortalité dus à ce phénomène dépendaient de la température et de la longueur d'onde, tandis que l'impact était 48 % plus grave pour les installations d'éclairage à base de LED (Pawson & Bader, 2014). Un comportement d'adaptation de la population a été observé dans une étude comparant des papillons de nuit urbains et ruraux. Les individus volant dans des zones à forte densité d'éclairage public étaient moins attirés par les sources lumineuses, ce qui constitue très probablement une transition évolutive augmentant la capacité de survie des papillons de nuit urbains (Altermatt & Ebert, 2016).

Réduction du succès de la reproduction

De nombreuses espèces marines programment la libération des gamètes dans l'eau en fonction des régimes de lumière naturelle. Un exemple classique est la synchronisation de la reproduction du ver palolo du Pacifique. Cette espèce ne s'accouple qu'une fois par an grâce à la fécondation croisée d'épitokes (parties du corps contenant des gamètes). Ces événements de ponte sont déclenchés par l'intensité lunaire exacte du troisième quartier de lune et, par conséquent, la synchronisation de la libération des gamètes dépend de la capacité des deux sexes à percevoir les cycles lunaires (Naylor, 2001). Une périodicité de reproduction similaire est observée dans les colonies de coraux. La planulation (libération des larves fécondées) de plusieurs espèces différentes est programmée en fonction de l'intensité lunaire (Tanner, 1996). Le zooplancton dépend également des signaux lumineux pour synchroniser le comportement de sa population, mais cette fois-ci en fonction du rythme jour-nuit. En général, la diminution de l'intensité lumineuse pendant la nuit sert de signal pour coordonner le moment

de la ponte. Lorsque la lumière du soleil disparaît, le zooplancton migre vers la surface de la mer (Cohen & Forward Jr, 2009). Dans les environnements marins pollués par la lumière, l'éclat du ciel causé par les émissions lumineuses anthropogéniques peut toutefois masquer la lumière de la lune, ce qui affecte négativement le succès reproductif de l'espèce.

Une fois de plus, la tortue de mer est une espèce océanique dont on a constaté qu'elle modifiait son comportement reproductif. Les tortues de mer femelles adultes évitent les plages très éclairées, ce qui entraîne une accumulation de nids sur des rivages inhabités exposés à de faibles intensités lumineuses. Outre le choix du site de nidification, la pollution lumineuse joue un rôle majeur dans le succès de la ponte. Les tortues femelles qui tentent de pondre des œufs sont stressées sur les plages exposées à des lumières artificielles, ce qui entraîne souvent un retour prématuré à l'eau, sans que la procédure de nidification ne soit achevée. Cette constatation a été faite pour six espèces différentes et est liée à un déclin global des populations (Witherington & Martin, 2003).

En outre, le nombre d'amphibiens nocturnes menacés d'extinction a augmenté parce que la lumière anthropogénique nocturne interfère avec leur procédure d'accouplement. Le crapaud commun (*Bufo bufo*) a fait l'objet de recherches visant à étudier l'effet de l'éclairage sur le comportement reproducteur des mâles. Il a été constaté que les mâles exposés à la lumière mettaient plus de temps à trouver une femelle avec laquelle s'accoupler et mettaient fin prématurément à la fécondation avant que la femelle n'ait fini de pondre. Ce dernier phénomène n'a jamais été observé dans des conditions de lumière naturelle (Touzot et al., 2020). D'autre part, on a constaté que les grenouilles femelles étaient moins sélectives lorsqu'elles choisissaient un partenaire d'accouplement dans les régions fortement polluées par la lumière. L'hypothèse présumée de cet ajustement comportemental est que les femelles préfèrent s'accoupler rapidement afin de réduire au minimum leur activité lorsqu'elles sont exposées à la lumière artificielle. Il pourrait s'agir d'une adaptation évolutive visant à compenser les performances plus faibles de l'autre sexe, tout en acceptant des déclinés qualitatifs chez les descendants (Rand et al., 1997).

On a également constaté que la lumière artificielle modifiait les schémas de reproduction chez des espèces terrestres telles que le wallaby tammar. Les individus dont l'aire de répartition est proche des zones urbanisées et qui sont donc davantage exposés à l'éclairage anthropique ont une moins bonne perception du rythme saisonnier, ce qui est lié à des retards de mise bas et à une réduction de la capacité de survie de la progéniture (Robert et al., 2015).

Systèmes de communication modifiés

Un grand nombre d'espèces communiquent en fonction de la lumière et sont donc particulièrement susceptibles d'être perturbées par les systèmes d'éclairage artificiel. Les indices bioluminescents ou les cycles lunaires sont utilisés par les espèces terrestres et aquatiques pour envoyer des signaux à d'autres individus de la même espèce (Davies et al., 2014). Alors que les vers luisants femelles utilisent des éclairs bioluminescents pour informer les mâles congénères de leur volonté de s'accoupler sur terre, les algues océaniques utilisent la bioluminescence comme mécanisme de défense pour attirer les grands prédateurs qui peuvent les protéger contre leurs propres prédateurs dans l'océan. Ces deux systèmes de communication sont altérés par des émissions lumineuses excessives et peuvent entraîner des taux de mortalité (Elgert et al., 2020 ; Haddock et al., 2010). Une autre espèce terrestre connue pour utiliser la lumière comme système d'information sensoriel est la luciole. Il a été constaté que les populations vivant dans des zones fortement polluées par la lumière réduisaient considérablement leurs activités lumineuses en raison de la difficulté à atteindre d'autres individus de la même espèce (Firebaugh & Haynes, 2016).

2.2.2 Modèles d'activité ajustés

Stratégies de recherche de nourriture adaptées

Plusieurs espèces utilisent l'obscurité ou la lumière pour se nourrir. Alors que l'obscurité sert de protection contre les prédateurs, la lumière est nécessaire pour détecter les sources de nourriture. En fonction de l'équilibre entre la lumière et l'obscurité, les modèles d'activité peuvent changer, affectant positivement ou négativement les organismes (Gaston et al., 2013). Les espèces proies, en particulier,

sont contraintes de réduire leur activité de récolte dans les zones touchées par la pollution lumineuse. En Floride, on a constaté que les souris de plage de Santa Rosa évitaient les zones fortement éclairées dans leur recherche de nourriture (Bird et al., 2004). Il a également été démontré que la lumière artificielle réduisait la capacité de la rainette grise à détecter les sources de nourriture et que l'activité de recherche de nourriture était considérablement réduite par l'éclairage (Buchanan, 1998).

D'autre part, on a constaté que les oiseaux prédateurs étaient de plus en plus actifs dans les régions éclairées artificiellement, prolongeant ainsi leurs périodes de recherche de nourriture. Par exemple, on a observé que les Moqueurs du Nord se nourrissaient de plus en plus d'oisillons après le coucher du soleil dans les zones touchées par la pollution lumineuse (Stracey et al., 2014). Plusieurs espèces de chauves-souris profitent de la lumière blanche émise par les lampadaires à faible consommation d'énergie. On a constaté qu'elles gravitaient autour des lampadaires pour se nourrir d'insectes attirés et exposés par ces derniers (Blake et al., 1994).

Réveil modifié

L'intensité, la couleur et le moment de l'éclairage peuvent affecter le réveil chez plusieurs espèces. Il a été constaté que les chauves-souris se perchent dans des zones affectées par la pollution lumineuse quittaient leur nid plus tard qu'elles ne le feraient dans des conditions de lumière naturelle. Un réveil retardé peut avoir un effet en cascade qui se traduit par des taux de réussite plus faibles lors de la recherche de nourriture en raison d'un temps réduit pour la détection de la nourriture ou de l'absence de la période pendant laquelle l'activité des insectes est maximale (Downs et al., 2003 ; Rydell et al., 2017).

Au contraire, un réveil plus précoce a été observé pour plusieurs espèces d'oiseaux affectées par les émissions lumineuses dans le cadre d'études expérimentales. Il a par exemple été constaté que l'heure à laquelle les mésanges bleues quittaient le nid dépendait uniquement de l'intensité lumineuse juste avant le lever du soleil (Schlicht et al., 2014).

2.2.3 Altérations physiologiques

Altération de la régulation hormonale

Des expériences menées avec des lumières artificielles et des espèces de différents taxons ont mis en évidence des effets néfastes sur le métabolisme et les niveaux d'hormones, qui ont été associés à des processus immunologiques ou au métabolisme. Les niveaux d'hormones de stress ont été étudiés chez les oiseaux chanteurs et il a été démontré qu'ils augmentaient en cas d'exposition répétée à des sources de lumière artificielle, en particulier celles qui contiennent beaucoup de longueurs d'onde courtes dans la partie blanche du spectre. Ce phénomène a été associé à une réduction du succès reproductif (Ouyang et al., 2015). Une autre étude expérimentale a montré que l'éclairage des sites de nidification entraînait une altération de la réponse immunitaire des nouveau-nés des mésanges charbonnières sauvages. Des niveaux différents de deux marqueurs importants nécessaires au développement d'une protection immunitaire suffisante ont été constatés par rapport aux oisillons exposés à un cycle naturel jour-nuit (Ziegler et al., 2021).

Altération du développement

Les jeunes poissons-clowns utilisent l'arrivée de l'obscurité comme signal d'éclosion, car dans des conditions naturelles, l'éclosion nocturne est beaucoup plus sûre en raison d'une pression de prédation réduite. En conséquence de ce comportement congénital, les œufs constamment exposés à la lumière n'éclosent pas, ce qui entraîne une diminution de la descendance dans les eaux fortement polluées par la lumière (Fobert et al., 2019). Une autre étude expérimentale sur le bar européen a montré qu'une perturbation du cycle naturel jour-nuit par une exposition constante à la lumière entraînait une altération du développement larvaire, de nombreuses malformations et une mortalité globalement plus élevée (Villamizar et al., 2011). Le traitement expérimental à la lumière a montré des effets négatifs à tous les stades de développement de la grenouille des bois. Alors que les embryons réussissaient moins bien à éclore et que les têtards étaient plus sensibles aux infections parasitaires, la taille des adultes augmentait considérablement pendant la métamorphose et les capacités de nage étaient altérées (May

et al., 2019).

Mutations moléculaires

L'expression des gènes à l'échelle du transcriptome a été étudiée chez des têtards provenant d'étangs fortement éclairés. Des mutations ont été trouvées principalement dans des régions génétiques responsables de la réponse immunitaire innée, mais aussi du métabolisme des lipides (Touzot et al., 2022). Des analyses moléculaires similaires chez les moustiques ont révélé une relation entre la lumière artificielle et l'altération de l'expression génétique dans les gènes régulant la gamétogenèse, l'immunologie et le métabolisme. En outre, il a été démontré que les réactions à l'influence de la lumière dépendent du sexe (Honnen et al., 2016).

Effets néfastes sur la physiologie des plantes

Les plantes dépendent de la lumière du soleil pour produire de l'énergie par photosynthèse, pour évaluer la proximité de la végétation concurrente, pour s'orienter dans la canopée et pour détecter les changements saisonniers grâce à la longueur du jour (Smith, 1982). La lumière artificielle ayant le pouvoir d'occulter les indices donnés par le cycle naturel de la lumière, les plantes sont sujettes aux effets néfastes de la pollution lumineuse. Des prairies ont été expérimentalement exposées à des niveaux d'éclairage typiquement mesurés dans les régions suburbaines d'Angleterre, ce qui a permis de mettre en évidence des changements physiologiques en termes de durée de floraison, de biomasse, de composition de la communauté et de couverture végétale (Bennie et al., 2016). En conséquence, il a été constaté que les arbres à feuilles caduques fleurissaient plus tôt et perdaient leurs feuilles plus tard dans l'année lorsqu'ils faisaient partie d'un écosystème éclairé artificiellement. Ces altérations phénologiques drastiques peuvent en outre entraîner une détérioration de la santé, de la capacité de survie et du succès reproductif (Ffrench-Constant, R. H. et al., 2016 ; Škvareninová et al., 2017). Il a été constaté que les plantes envahissantes prospèrent dans des conditions d'éclairage artificiel, ce qui entraîne une diminution de l'aptitude des plantes indigènes et une modification significative de la composition des espèces (Murphy et al., 2022). Des recherches visant à accroître la valeur économique du soja ont montré que l'éclairage artificiel entraînait des changements génétiques, qui étaient en outre liés à des périodes de floraison retardées, à une croissance altérée et à une perte de rendement (Kim et al., 2012). L'altération de la physiologie des plantes causée par les systèmes d'éclairage anthropiques peut se répercuter sur les pollinisateurs et les herbivores et avoir des conséquences négatives sur l'ensemble des réseaux alimentaires (Bennie et al., 2016).

2.2.4 Remarques finales sur les conséquences écologiques

Encadré 2.2 : Comment interpréter les données écologiques ?

Les recherches publiées sur les effets négatifs de la lumière artificielle sur la biodiversité mondiale ont montré que diverses espèces animales souffrent de changements comportementaux, habituels et physiologiques, qui se traduisent souvent par une perte de forme physique. Si les tendances actuelles en matière de pollution lumineuse se poursuivent, la proportion d'écosystèmes non affectés par les régimes de lumière artificielle continuera à diminuer et, avec elle, ces effets néfastes prévaudront, voire augmenteront.

Cependant, la connaissance des conséquences écologiques causées par ALAN est encore limitée, et le terrain offre de nombreuses possibilités de recherche appliquée pour étayer les résultats préliminaires obtenus en laboratoire. Afin de quantifier la menace écologique, il est nécessaire d'évaluer les espèces particulièrement vulnérables aux changements du cycle naturel jour-nuit ainsi que leur potentiel d'exposition à la lumière anthropogénique. La littérature actuelle se concentre principalement sur les animaux terrestres, surtout les insectes, les oiseaux ou les amphibiens, vivant dans les zones climatiques tempérées, tandis que d'autres groupes d'espèces et écosystèmes ont été largement négligés. Les tropiques se caractérisent par une longueur de jour stable avec des variations saisonnières minimales tout au long de l'année et sont donc susceptibles d'être perturbés par la lumière artificielle qui perturbe ces schémas constants. Les écosystèmes aquatiques, où les signaux lumineux naturels sont d'une importance capitale pour la dynamique des espèces, sont également très peu étudiés. En outre, la pollution lumineuse est souvent liée à diverses perturbations humaines telles que le bruit, la

contamination chimique ou la construction, qui peuvent avoir des effets cumulatifs et confondants sur la faune et la flore. Les études sur les populations naturelles impliquant des écosystèmes complets et portant sur la dynamique des espèces et les interactions trophiques sont rares. Jusqu'à aujourd'hui, la lumière artificielle nocturne n'est pas encore totalement reconnue comme une menace pour l'environnement et n'est souvent pas incluse dans la planification des concepts de conservation ou des protocoles de surveillance qui pourraient quantifier de manière fiable les conséquences écologiques négatives de la pollution lumineuse. (Davies et al., 2014 ; Gaston et al., 2012 ; Longcore & Rich, 2004).

2.3 Écosystèmes

L'augmentation de la luminosité du ciel nocturne causée par la lumière anthropique émise vers le haut et diffusée par les particules dans l'atmosphère peut altérer le niveau de luminance naturelle relativement faible du ciel nocturne. L'altération de la vision des objets célestes due à la pollution lumineuse est donc un impact écologique clairement visible. Lors d'une nuit sans lune, une intensité lumineuse d'environ 22 magnitudes par seconde d'arc carré ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$) est émise par les étoiles, la Voie lactée et la lumière zodiacale. Si la luminosité artificielle du ciel dépasse 10 % de ces niveaux de lumière naturelle, soit une luminance de plus de 14 microcandela par mètre carré au zénith ($\mu\text{cd}/\text{m}^2$), on parle de ciel pollué par la lumière. Aujourd'hui, 83 % de la population mondiale et plus de 99 % des habitants d'Europe ou d'Amérique du Nord vivent dans des environnements pollués par la lumière (Falchi et al., 2016). La pollution lumineuse n'est pas seulement un problème des zones urbanisées, mais peut également affecter le ciel nocturne dans les zones rurales. Une ville d'environ 1,5 million d'habitants peut potentiellement augmenter la luminosité du ciel de 25 % dans une localité située jusqu'à 80 km à la campagne. En plus de cette luminance, les sources lumineuses rurales intensifient l'éclat du ciel (Gallaway et al., 2010). La pollution lumineuse peut encore s'intensifier en fonction des conditions météorologiques et de la quantité de particules présentes dans la basse atmosphère. Par exemple, il a été constaté que la couverture nuageuse amplifiait la luminance du ciel de 2 à 10 fois et qu'une augmentation de certains aérosols était significativement liée à un éclaircissement du ciel nocturne. Dans des conditions atmosphériques défavorables, la luminance combinée émise par les sources d'éclairage artificiel urbaines produit un éclairage de fond diffus comparable à un clair de lune estival relativement lumineux, typique des localités situées en altitude. On estime que 5 % de la masse terrestre mondiale est régulièrement exposée à de tels niveaux de luminance, tout comme 23 % de l'Amérique du Nord, 37 % des pays de l'Union européenne et 54 % du Japon (Kocifaj & Barentine, 2021 ; Kyba et al., 2011).

Outre la pollution lumineuse astronomique, le terme de pollution lumineuse écologique a été défini comme la lumière artificielle qui perturbe le cycle naturel lumière-obscurité des écosystèmes, en mettant l'accent sur les conséquences écologiques négatives concernant les interactions trophiques et le fonctionnement de l'écosystème. Au début de ce siècle, plus de 18 % de la masse terrestre mondiale était polluée par la lumière et ce chiffre augmentait chaque année. Les navires de croisière illuminés, les torchères des plates-formes pétrolières et les projecteurs des bateaux de pêche perturbent encore davantage le ciel nocturne naturel des océans du monde entier (Longcore & Rich, 2004). La réduction de la connectivité des paysages est un exemple de la manière dont la pollution lumineuse peut avoir un impact négatif sur des écosystèmes entiers. La perméabilité de l'environnement détermine la capacité des animaux à se déplacer entre les habitats et est nécessaire pour éviter la fragmentation en petites sous-populations. La connexion des parcelles d'habitat a été une priorité dans les pratiques de conservation, traditionnellement axées sur des améliorations structurelles telles que la construction de corridors, la réduction des obstacles au mouvement ou l'augmentation de la taille des parcelles. La lumière anthropique étant un important facteur non structurel ayant un impact négatif sur la connectivité du paysage, il est important d'intégrer la pollution lumineuse dans les plans de gestion durable de la faune (Laforge et al., 2019). La dynamique des écosystèmes peut en outre être perturbée par des impacts sur les interactions trophiques. Cela s'avère particulièrement problématique lorsqu'une espèce clé de voûte, qui sert à la fois de source de nourriture pour les prédateurs et d'acteur important dans le maintien de la santé de l'écosystème, subit un déclin de sa condition physique

entraînant une réduction de sa capacité de survie en raison de la pollution lumineuse (Jechow et al., 2021).

Selon la source d'éclairage, la lumière émise peut présenter des caractéristiques spectrales, temporelles et spatiales différentes. Les valeurs dans ces trois catégories peuvent varier considérablement, ce qui rend difficile la quantification de l'effet sur les régimes de lumière naturelle. Dans les tentatives précédentes d'identification des implications écologiques de la pollution lumineuse, de tels effets négatifs combinés sur les écosystèmes n'ont souvent pas été anticipés, ce qui peut avoir conduit à l'idée générale que les effets écologiques négatifs sont plutôt localisés ou limités à seulement quelques groupes d'espèces sensibles à la lumière (Gaston et al., 2013).

3 Base législative pour surveiller et contrôler la pollution lumineuse

Malgré les inquiétudes suscitées par l'impact négatif de la lumière artificielle sur la santé humaine, la biodiversité et les écosystèmes, il n'existe actuellement pas de cadre juridique commun réglementant la pollution lumineuse dans l'ensemble des pays de l'UE. L'ALAN n'a pas encore été reconnu comme un contaminant grave et, par conséquent, l'adoption de politiques visant à atténuer ses conséquences négatives n'est souvent pas une priorité. Cependant, des directives européennes obligatoires visant spécifiquement les exigences en matière d'éclairage sont déjà en place. La directive européenne sur l'écoconception et la directive sur l'étiquetage et l'abrogation en matière d'énergie garantissent une installation d'éclairage efficace sur le plan énergétique, mais ne comportent pas de section traitant des effets néfastes de la pollution lumineuse. Ces documents constituent un cadre juridique existant dans lequel des politiques de lutte contre la pollution lumineuse pourraient éventuellement être intégrées à l'avenir (Commission européenne, 2005 ; Commission européenne, 2010 ; Conseil européen, 2000). La pollution lumineuse a également été considérée comme un facteur perturbateur dans la stratégie en faveur de la biodiversité, les directives "Oiseaux et habitats" et l'initiative "Pollinisateurs", ainsi que dans les directives EIA/SEA mises en place pour évaluer les impacts environnementaux et protéger la diversité des espèces (Commission européenne, 2001 ; Commission européenne, 2018). L'Union européenne fournit des recommandations sous la forme de documents non contraignants, tels que les *marchés publics écologiques de l'UE*, qui préconisent des moyens de réduire la pollution lumineuse et ses effets négatifs sur la biodiversité et la visibilité des objets célestes. Le document a été mis à jour en 2019 avec un encouragement "Aussi bas que raisonnablement possible (ALARA)" pour réduire au minimum les niveaux de lumière dans la circulation et les rues publiques. L'adhésion à ces recommandations reste toutefois volontaire (Donatello et al., 2019 ; Testa et al., 2016). En outre, la pollution lumineuse a été incluse en tant qu'objectif prioritaire dans le Green Deal européen et le plan d'action zéro pollution du 8e programme d'action pour l'environnement visant à protéger le bien-être des humains, des animaux et des écosystèmes, en plus de réduire les facteurs de risque dans l'environnement (Conseil de l'Union européenne, 2020 ; Commission européenne, 2019). Même dans le règlement sur le financement durable, la pollution lumineuse a été répertoriée comme un polluant important (Commission européenne, 2021).

3.1 États membres de l'UE

Les législations relatives à la pollution lumineuse dans les pays de l'UE peuvent être grossièrement résumées en trois catégories : (1) les pays dotés de politiques nationales, (2) les pays dotés de politiques régionales plus ou moins strictes, (3) Les pays qui n'ont pas de politiques en place, mais seulement des documents non contraignants fournissant des lignes directrices pour atténuer les émissions lumineuses. Ces derniers disposent souvent d'un cadre juridique existant dans lequel des réglementations visant à réduire la pollution lumineuse pourraient éventuellement être intégrées. Nous présentons ci-dessous des exemples pour chaque catégorie.

3.1.1 Politiques nationales

La République tchèque est devenue le premier pays de l'UE à disposer d'une politique nationale de réduction de la pollution lumineuse en 2002. Dans la loi tchèque sur la pureté de l'air, la pollution lumineuse est définie comme une lumière artificielle dispersée dans des zones qu'elle n'est pas censée éclairer, ce qui est particulièrement problématique si elle est émise au-dessus du niveau de l'horizon. Pour prévenir activement la pollution lumineuse, des limites supérieures d'émissions lumineuses ont été définies, des coupe-flux sur des réverbères et la modification des installations d'éclairage pour réduire la diffusion de la lumière vers le haut ont été rendus obligatoires et les autorités municipales ont été obligées de mettre en œuvre les mesures formulées depuis lors. Des amendes allant jusqu'à 3 160 euros peuvent être imposées en cas de violation de la loi (Parlement de la République tchèque, 2002). Malheureusement, la pollution lumineuse a de nouveau été omise dans le cadre des amendements. En 2017, la loi n° 114/1992 sur la protection de la nature et des paysages a été révisée en réponse aux préoccupations exprimées au gouvernement par le ministère tchèque de

l'environnement. Des règles plus strictes pour l'introduction de sources lumineuses dans les parcs nationaux ont été formulées pour atténuer la pollution lumineuse. En outre, les règles visant à réduire la pollution lumineuse ont été intégrées à la subvention de l'État pour la modernisation des systèmes d'éclairage, qui ne soutient désormais que les lampes d'une puissance lumineuse de 2700K ou moins, à titre d'exemple. En 2021, un manuel d'éclairage a été publié, comprenant des recommandations pour l'éclairage public, les installations d'éclairage privées ou les installations lumineuses architecturales, et de nouvelles normes visant à limiter les effets indésirables de l'éclairage extérieur sont en cours d'élaboration. Grâce à plusieurs mémorandums, quatre régions au ciel nocturne immaculé (Bystřická, Manětínská, Jizerská et Beskydská) en République tchèque ont été protégées (Ministère de l'environnement et de la République tchèque, 2022).

La Croatie a introduit la loi NN 14/2019 sur la protection contre la pollution lumineuse dans le but principal de réduire la consommation d'énergie du pays. La première version a été élaborée sur une période de 8 ans à partir de 2008, mais elle s'est rapidement révélée inefficace pour réduire la pollution lumineuse. Par conséquent, la législation a été récemment révisée et comprend de nouvelles normes de gestion de l'éclairage, des restrictions liées aux systèmes d'éclairage excessifs et des procédures à inclure dans la planification de la construction, de l'entretien ou de la reconstruction des installations d'éclairage (Parlement croate, 2019). Plus important encore, l'ordonnance NN 128/2020 sur les zones d'éclairage, les valeurs d'éclairage autorisées et les méthodes de gestion des systèmes d'éclairage, incluse dans l'article 9 de la loi en vigueur, prévoit des zones d'éclairage avec des valeurs d'éclairage maximales autorisées et des méthodes de gestion des systèmes d'éclairage. Elle comprend des zones d'éclairage avec des limites d'éclairage maximales autorisées, des méthodes obligatoires de contrôle de l'éclairage et des critères de sélection stricts pour l'installation de produits d'éclairage afin de garantir l'efficacité énergétique (Ministère de l'économie et du développement durable, 2020). En outre, le ministère de l'économie et du développement durable prépare une ordonnance sur le contenu, la mise en forme et la rédaction du plan d'éclairage et du plan d'action pour la construction et/ou la reconstruction de l'éclairage extérieur dans le cadre des articles 12 et 13 de la loi sur la protection contre la pollution lumineuse, ainsi qu'une ordonnance sur la mesure et la surveillance de l'éclairage environnemental à inclure dans l'article 10 (ministère de l'environnement de la République tchèque, 2022).

La Slovénie a adopté une réglementation sur la pollution lumineuse à l'échelle nationale en 2007. La communauté astronomique très active a attiré l'attention sur la pollution lumineuse croissante du ciel et sur la détérioration de la visibilité des étoiles qui en découle. La sensibilisation du public s'est accrue en conséquence et a donné lieu à des délibérations entre les experts et le gouvernement pour formuler la loi. Un premier projet de loi sur la protection de l'environnement a été préparé par le ministère de l'environnement dès 1999 et visait à atténuer les effets biologiques, astronomiques et économiques néfastes des émissions lumineuses excessives. Le décret final se compose de 31 articles fixant des seuils d'éclairage, des restrictions techniques sur les installations lumineuses et des plans d'inspection assortis de sanctions. Les politiques réglementent les émissions lumineuses pour l'ensemble de la population, y compris les espaces publics tels que les monuments, les églises, les aéroports, les ports, les gares ou les autoroutes, ainsi que pour les immeubles de bureaux privés et les installations de production. Un exemple d'article assez strict formulé dans la loi est que les municipalités slovènes ne peuvent dépenser qu'un maximum de 44,5 kilowattheures par habitant et par an pour l'éclairage (Le Parlement de la République tchèque, 2002).

Aujourd'hui, le cadre juridique français est l'un des plus avancés en matière de limitation des émissions lumineuses. La loi a été élaborée en étroite collaboration avec l'association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturnes (ANPCEN), une communauté d'astronomes amateurs préoccupée par les effets néfastes de la pollution lumineuse sur la population française et les écosystèmes naturels. L'arrêté du 27 décembre 2018 relatif à la prévention, la réduction et la limitation des nuisances lumineuses est une politique nationale contraignante avec des normes élevées. Il réglemente l'éclairage de divers lieux tels que les voies publiques et privées, les parcs et jardins, les églises et monuments, les installations sportives et les parkings ou les bâtiments non résidentiels et industriels. En outre, des programmes d'éclairage clairs ont été mis en place pour les zones d'activité économique ou les chantiers de construction, et des seuils de rapport lumineux vers le haut, de flux émis

vers le bas (pour atténuer l'éblouissement et l'éclairage intrusif) et de température de couleur corrélée (pour réguler le mélange de longueurs d'onde ou la densité du flux lumineux installé) ont été définis. Un aspect important de la loi française est une extinction nocturne stricte interdisant l'éclairage des installations industrielles pendant les premières heures de la journée et obligeant en outre à éteindre tous les éclairages extérieurs une heure après que le dernier employé a quitté l'immeuble de bureaux. La mise en œuvre progressive de ces politiques a commencé en 2019 et il est prévu de les rendre complètement obligatoires d'ici 2025 (Ministre de la transition écologique et solidaire, 2018).

3.1.2 Politiques régionales

L'Italie est considérée comme le pays ayant les plus anciennes politiques régionales concernant la pollution lumineuse. En 1942, une loi visant à protéger une zone de ciel noir autour de l'observatoire astronomique de Tuscolo a été adoptée dans la communauté de Monte Porzio Catone, à l'est de Rome, afin de maintenir la possibilité d'observer les étoiles (Simoneau et al., 2020). Au fil du temps, des politiques strictes ont été adoptées dans le reste de la région de Lombardie du Nord pour limiter les émissions lumineuses, la première étant la Vénétie en 1997. Les textes législatifs réglementent l'efficacité énergétique des installations d'éclairage, imposent des extinctions nocturnes pour l'éclairage des bâtiments publics, définissent des seuils d'émissions lumineuses et prévoient souvent des plans d'éducation de la communauté pour sensibiliser le public. Les politiques concernant les zones de protection autour des observatoires sont particulièrement strictes, de même que la pénétration de la lumière à l'horizontale, qui est expressément interdite. Alors que les régions de Sardaigne, de Sicile, de Calabre, du Trentin-Haut-Adige et de Molise n'ont toujours pas de loi pour atténuer les émissions lumineuses, les réglementations des autres régions diffèrent principalement au niveau de l'application et du processus de contrôle. Au niveau national, la norme italienne fournit des lignes directrices non contraignantes et inadéquates à la protection contre les effets négatifs de la pollution lumineuse (Marín et al., 2009).

En Espagne, seules huit des dix-sept communautés autonomes disposent de réglementations spécifiques en matière de pollution lumineuse : Andalousie, Canaries, Cantabrie, Castille et Léon, Catalogne, Estrémadure, Îles Baléares et Navarre. Dans ces régions, les politiques encouragent une utilisation efficace de l'éclairage extérieur, favorisent la préservation des écosystèmes naturels, visent à protéger le ciel noir autour des observatoires astronomiques et contribuent à minimiser les intrusions lumineuses inutiles (Comunidad Autónoma de Cataluña, 2001). La loi sur la protection de la qualité astronomique des observatoires Instituto de Astrofísica de Canarias a été adoptée en 1988 par le gouvernement des îles Canaries et constitue l'une des réglementations les plus complètes visant à réduire la pollution lumineuse en Espagne (Ministerio de la Presidencia y para las administraciones territoriales, 2017).

Dans la région flamande de Belgique, une législation concernant la pollution lumineuse provenant de sources lumineuses privées est en vigueur depuis 1996. Cette loi a été formulée dans le cadre de VLAREM II, la réglementation flamande en matière d'environnement, dans le but de réduire la pollution lumineuse. Cependant, l'éclairage public n'est toujours pas réglementé. Les mesures comprennent le type d'installations d'éclairage, la suppression des systèmes d'éclairage et des recommandations pour l'adaptation de l'éclairage obsolète. Le gouvernement flamand réglemente en outre l'installation de panneaux d'affichage LED à proximité immédiate des routes afin de garantir la sécurité du trafic, ce qui a également un impact positif sur la pollution lumineuse (Parlement Wallon, 2019). Une enquête sur l'éclairage inutile a été lancée en 2021 en ce qui concerne la pollution lumineuse, la consommation d'électricité et la protection de la biodiversité (Ministère de l'environnement de la République tchèque, 2022).

3.1.3 Pas de politiques, seulement des lignes directrices non contraignantes

Il n'existe pas de loi spécifique visant à atténuer ou à réduire les effets néfastes de la pollution lumineuse sur la santé en Irlande. Toutefois, un manuel sur la protection de la nuit a été élaboré par le Mayo Dark Sky Park, en collaboration avec l'International Dark-Sky Association, afin d'informer le grand public des données et des faits relatifs à la pollution lumineuse. Ce document comprend également des

recommandations pour les autorités locales concernant les installations d'éclairage privées et commerciales. Aucune limite spécifique, mais seulement des lignes directrices ont été formulées. Par exemple, il est suggéré d'utiliser des éclairages privés à faible puissance, à diffusion minimale et aux couleurs chaudes. De plus, il est recommandé de réduire l'intensité lumineuse et d'éteindre les lumières la nuit. Les nouveaux projets incluant le développement d'une stratégie d'éclairage sont traités au cas par cas (Dark Sky Ireland, 2019). En 2018, un groupe de parties prenantes, d'intellectuels, de représentants de parcs nationaux et d'astronomes a été formé, appelé Dark Sky Ireland, dans le but de sensibiliser le public. Ils ont récemment lancé le programme Dark Skies For All pour organiser des événements concernant l'élaboration de politiques, l'éducation et la sensibilisation du public (Dark Skies for All, 2022).

L'Autriche est un autre pays qui ne dispose pas d'un cadre juridique traitant de la pollution lumineuse au niveau national. Le sujet est abordé dans des documents ou des normes non contraignants et les mesures ne peuvent être appliquées que dans des cas spécifiques par le biais de différentes compétences du gouvernement, à l'instar de la procédure législative allemande. Des politiques contraignantes visant à réduire les effets négatifs de la lumière artificielle pourraient toutefois être intégrées dans la protection de l'environnement, la santé humaine, le droit de la construction et les réglementations industrielles. La publication du document "Guidelines for Outdoor Lighting" en 2018 a montré que la pollution lumineuse est un sujet de préoccupation. Ces recommandations ont été élaborées en collaboration avec la plupart des États autrichiens et comprennent des limites techniques en termes de température de la lumière et de direction du flux lumineux, ainsi que des extinctions nocturnes pour interdire l'éclairage pendant la nuit. Les politiques futures seront très probablement adoptées au niveau du groupe d'États avant l'inclusion d'un texte législatif contraignant concernant la pollution lumineuse dans la constitution fédérale (Austria Standards, 2016). La norme ÖNORM O 1052 vient d'être mise à jour cette année et fournit des recommandations en matière d'éclairage basées sur un travail de collaboration avec l'International Dark-Sky Association (Austria Standards, 2022).

Le Liechtenstein est un exemple de pays qui a déjà défini la lumière artificielle comme une source de rayonnement potentiellement nocif dans la *loi sur la protection de l'environnement*, qui est un document national contraignant. Toutefois, selon ce document, les seuils ne seront appliqués que s'il est clairement prouvé que les émissions lumineuses ont un impact négatif sur la sécurité, les activités économiques ou le bien-être du public. Une reformulation ou une extension de la législation existante permettrait de contrôler suffisamment les conséquences négatives d'un éclairage excessif. Le rapport *Light Pollution in Liechtenstein* a été publié par l'Office de protection de l'environnement en 2008, attirant l'attention sur les caractéristiques problématiques de la lumière artificielle (Amt für Umweltschutz, 2008).

Tableau 3.1 : Aperçu des actions européennes visant à réduire la pollution lumineuse

Country	Legislation ¹	Standard	Manual ²	Other ³
Austria	X	✓	✓	✓
Belgium	X	✓	✓	✓
Bulgaria	X	✓	X	X
Croatia	✓	X	X	✓
Cyprus	X	X	X	✓
Czech Republic	(✓)	(✓)	✓	✓
Denmark	(✓)	X	✓	✓
Estonia	X	X	X	✓
Finland	(✓)	X	(✓)	X
France	✓	X	X	✓
Germany	✓	X	✓	✓
Greece	✓	X	X	✓
Hungary	(✓)	X	✓	✓
Iceland	X	X	X	✓
Ireland	X	X	✓	✓
Italy	✓	✓	X	X
Latvia	(✓)	X	X	✓
Liechtenstein	X	X	X	✓
Lithuania	X	X	X	X
Luxembourg	X	X	✓	✓
Malta	✓	✓	(✓)	✓
Netherlands	(✓)	X	✓	✓
Norway	X	X	✓	X
Poland	X	X	X	✓
Portugal	X	X	✓	✓
Romania	X	X	X	✓
Slovakia	(✓)	X	X	✓
Slovenia	(✓)	X	✓	✓
Spain	✓	X	✓	✓
Sweden	✓	(✓)	✓	X
Switzerland	(✓)	✓	✓	✓
United Kingdom	✓	X	✓	✓

- 1 ✓ signifie qu'il existe un acte législatif désigné (au niveau local/régional/national) traitant de la pollution lumineuse ; (✓) signifie qu'il n'existe pas d'acte législatif désigné traitant de la pollution lumineuse, mais que des dispositions d'autres actes législatifs peuvent être utilisées ; X signifie qu'il n'existe pas de législation traitant de la pollution lumineuse.
- 2 ✓ signifie qu'un guide/manuel pour un éclairage correct a été publié dans le pays ; (✓) signifie qu'un guide/manuel est en cours de réalisation ; X signifie qu'aucun manuel/manuel n'existe ou n'est en préparation
- 3 Autres signifie le pays, par exemple Dark Sky Area, projets spécifiques, dédiés à la pollution lumineuse

Source : Ministère de l'environnement de la République tchèque, 2022.

3.2 Approches globales pour atténuer la pollution lumineuse

L'analyse de la situation juridique dans une sélection de pays de l'UE montre que la pollution lumineuse peut être réduite ou atténuée le plus efficacement possible par une loi contraignante au niveau national. Cela réduit les incertitudes des utilisateurs de lumière, diminue la possibilité de tricher au minimum et facilite l'application de la loi par les autorités publiques. À l'échelle mondiale, il existe plusieurs approches différentes quant à la formulation d'une telle loi nationale. Alors que certains pays insistent sur des seuils et des catégories stricts pour les différentes installations d'éclairage, d'autres s'appuient sur des extinctions nocturnes strictes et des avancées technologiques. Des différences ont également été identifiées dans le processus de mise en œuvre. Certains gouvernements complètent les lois existantes par un règlement sur la pollution lumineuse, tandis que d'autres formulent une loi entièrement nouvelle. Dans la section suivante, nous présentons différentes versions des politiques mondiales de lutte contre la pollution lumineuse qui ont réussi à ralentir la tendance à la hausse des émissions lumineuses.

3.2.1 Politique dépendant de mesures strictes

La République de Corée

Le gouvernement métropolitain de Séoul a adopté une loi nationale appelée ordonnance sur la prévention et la gestion de la pollution lumineuse en 2010. Cette politique prévoit des réglementations pour les installations d'éclairage dans les trois domaines suivants : éclairage des espaces, éclairage décoratif, éclairage publicitaire, et classe toutes les régions de Corée dans les quatre catégories suivantes : E1 (zones vertes pour la conservation), E2 (zones vertes naturelles et zones vertes productives), E3 (zones résidentielles), E4 (zones semi-industrielles et commerciales). Ces zones sont définies dans la loi coréenne sur la planification et l'utilisation du territoire national, autorisant les niveaux d'éclairage les plus élevés dans les zones commerciales et protégeant simultanément les zones sauvages et leurs écosystèmes naturels dans les zones rurales. Des seuils de luminance spécifiques sont formulés pour chaque zone de gestion de l'environnement lumineux, ce qui ne laisse aucune place aux incertitudes législatives. Cette approche très structurée évite au public d'avoir à être proactif dans l'application des politiques et réduit les conflits. En outre, en cas de non-respect, les autorités locales ont le pouvoir d'imposer des sanctions dont le montant augmente en fonction du nombre d'infractions. La politique coréenne sur la pollution lumineuse est un autre exemple de cadre politique progressiste en termes de responsabilité, d'affirmation juridique et d'incitation (Guanglei et al., 2019).

3.2.2 Une politique couplée à une approche éducative

Australie

Le gouvernement australien a été l'un des premiers à reconnaître officiellement la lumière artificielle comme une source de pollution dans la loi sur la protection de l'environnement de 1997, la définissant ainsi comme une menace pour la santé humaine et environnementale. La loi sur la protection de l'environnement et la conservation de la biodiversité (Environment Protection and Biodiversity Conservation Act) de 1999 a également fourni des informations techniques pour guider spécifiquement l'atténuation de la pollution lumineuse et de ses effets néfastes sur les espèces menacées qui font partie des communautés écologiques répertoriées. La norme australienne a alors été adoptée pour limiter les effets gênants de l'éclairage extérieur, tant physiologiques que psychologiques. Une sélection de changements dans la conception des installations d'éclairage a été mise en œuvre afin de gérer simultanément la pollution lumineuse, de maximiser l'efficacité énergétique et de minimiser les impacts négatifs sur la population et la faune australiennes. Des limites ont été définies pour différents scénarios d'éclairage et des extinctions nocturnes ont été imposés pendant la saison migratoire de certaines espèces. Les décideurs australiens ont adopté une approche éducative, cherchant à accroître l'engagement des citoyens en soulignant les nombreux effets négatifs de la lumière électrique dans les politiques de lutte contre la pollution lumineuse et en sensibilisant ainsi le public (Kyba et al., 2014).

3.2.3 *Politique intégrée dans la législation existante*

Royaume-Uni

Dans la législation anglaise, les réglementations relatives à la pollution lumineuse ont été ajoutées aux réglementations existantes au lieu d'adopter une nouvelle politique spécifique. Cela a considérablement facilité le processus de mise en œuvre et les effets négatifs dus à la lumière artificielle ont été rapidement pris en compte dans les pratiques courantes, mais les réglementations manquent constamment d'efficacité en raison de leur nature non spécifique. La plupart des questions relatives à l'éclairage sont traitées dans la section de la loi consacrée aux nuisances, ce qui signifie que les conséquences juridiques n'interviennent que si une interférence avec les désagréments personnels dus aux émissions lumineuses peut être directement liée à des effets sur la santé humaine. Ces cas individuels sont ensuite réglés par l'application de la loi sur la protection de l'environnement (Environmental Protection Act), formulée en 1990 (Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2022). Un autre exemple est la prise en compte de la pollution lumineuse dans la planification de la construction de nouveaux bâtiments. Cependant, ces réglementations se concentrent moins sur les effets intrusifs que sur l'esthétique. Récemment, une note d'orientation a été publiée pour réviser les politiques en matière de pollution lumineuse dans le droit de la construction, ce qui a entraîné un conflit réglementaire entre les installateurs d'éclairage et les autorités locales. De tels problèmes peuvent être plus facilement résolus en s'appuyant sur des seuils définis et des restrictions horaires en matière d'éclairage (Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2013). Toutefois, dans la version révisée de la loi juridiquement contraignante sur l'environnement publiée en 2020, la pollution lumineuse n'a toujours pas été incluse en tant que polluant environnemental, ce qui signifie que des mesures strictes ne peuvent toujours pas être prises (Dark Skies for All, 2022).

3.2.4 *Formulation d'une politique en collaboration avec la communauté astronomique*

Chili

Au cours des dernières décennies, le Chili s'est imposé comme la capitale mondiale de l'astronomie grâce aux efforts politiques considérables déployés pour protéger le ciel nocturne. Dès les années 1990, la communauté astronomique a critiqué l'augmentation de la pollution lumineuse. En particulier dans le nord du pays, où se trouvent la plupart des observatoires, les villes se développent et, simultanément, les installations d'éclairage s'accroissent pour illuminer les nuits. Cela rendait l'observation des corps célestes de plus en plus difficile. Cependant, les décideurs politiques chiliens ont réagi positivement à ces préoccupations, ce qui a conduit à la formulation du décret suprême n° 686 par le ministère de l'économie en 1998. Ce décret comprenait des réglementations sur les caractéristiques des éclairages extérieurs permettant d'atténuer les émissions lumineuses vers le haut, ainsi que la création de l'Office de la qualité du ciel dans le nord du Chili (OPCC). Actuellement, le gouvernement chilien collabore avec l'OPCC, un consortium d'observatoires internationaux basés dans le pays et la société nationale d'astronomie (SOCHIAS) pour mettre fréquemment à jour les législations relatives à la pollution lumineuse afin de préserver le ciel clair du Chili. Au cours de la dernière décennie, les diodes électroluminescentes à faible consommation d'énergie produisant une lumière vive, principalement dans la partie bleue du spectre, ont gagné en popularité. Cette nouvelle technologie a souvent été utilisée à des fins publicitaires, les grands écrans plats à LED menaçant de générer une pollution lumineuse accrue. Grâce au cadre politique avancé du Chili, il a été possible d'éviter une augmentation de la luminosité du ciel nocturne par l'adoption du nouveau décret suprême n° 43 par le ministère de l'environnement en 2014. La nouvelle loi réglemente strictement l'installation de systèmes d'éclairage pour la publicité, dans le secteur industriel et dans les zones de loisirs. Plus important encore, elle interdit les émissions lumineuses au-dessus de l'horizontale et n'autorise qu'une partie minimale de la lumière émise à des fréquences bleues (AURA & AURA-O, 2015).

4 Normes et méthodes de surveillance pour évaluer la pollution lumineuse

4.1 Quantifier la lumière dans l'environnement

La luminosité totale du ciel nocturne est une combinaison de sources de lumière naturelle et de lumière artificielle diffusée par l'atmosphère terrestre. En fonction de la luminosité de cette dernière, la visibilité des objets célestes peut diminuer, ce qui est également appelé pollution lumineuse environnementale. C'est pourquoi la luminosité du ciel nocturne (NSB pour night sky brightness) est souvent utilisée comme indicateur pour quantifier la pollution lumineuse. Pour l'évaluation de la luminosité du ciel nocturne, il est important de faire la distinction entre l'inclusion de toutes les sources de lumière naturelle ("luminosité du ciel") et la mesure de la visibilité des étoiles ("luminosité du fond du ciel"). En général, deux paramètres sont utilisés pour mesurer la lumière dans l'environnement. Alors que l'"irradiance" est définie comme la quantité totale de rayonnement électromagnétique frappant une surface, la "radiance" fait référence à la luminosité totale qui apparaît dans le champ de vision. Souvent, la radiance d'une gamme spécifique de longueurs d'onde est mesurée, ce qui est également appelé la radiance spectrale. Lorsque ce spectre de mesure est adapté à la perception humaine, il est appelé "luminance" ou "éclairage" (Hänel et al. 2018).

Les unités les plus courantes pour quantifier la luminosité du ciel sont la magnitude par seconde d'arc au carré ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$), la candela par mètre carré (cd/m^2) ou le lux (lx). Le système de magnitude est le plus ancien des trois et a été développé pour quantifier la luminosité du ciel en termes de visibilité des étoiles. Une magnitude de 1 est définie par l'intensité lumineuse de l'étoile la plus brillante visible à l'œil nu et plus le ciel est sombre, plus les valeurs mesurées en $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ sont faibles. Une fois encore, la radiance mesurée peut être ajustée aux longueurs d'onde perçues par l'œil humain en évaluant la lumière émise dans la bande spectrale verte V (v = visuelle). Dans ce cas, l'unité $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ peut être convertie en luminance (cd/m^2) avec la formule suivante (Garstang, 1986) :

$$\text{cd}/\text{m}^2 = 10,8 * 10^4 * 10^{-0,4 * \text{mag}_v}$$

Alors que la candela décrit l'intensité lumineuse d'une source de lumière (densité de lumière), le lux est souvent utilisé pour mesurer l'éclairage d'une surface et peut être converti en lumen par mètre carré (lm/m^2). Pour tenir compte de cette différence méthodologique, une multiplication du cd par le stéradian (radian carré, sr) est nécessaire pour la conversion de ces deux unités (Wei-Chung Cheng & Pedram, 2004) :

$$\text{lux} = \text{lm}/\text{m}^2 = (\text{cd} * \text{sr})/\text{m}^2$$

4.2 Dispositifs commerciaux

4.2.1 Mesure de la qualité du ciel (SQM)

Cet appareil automatique très abordable mesure la photométrie du ciel nocturne et peut être facilement utilisé et installé à l'endroit de votre choix. Le SQM est un photomètre de poche principalement utilisé par les astronomes amateurs et le grand public. Cependant, le SQM ne fournit pas les mesures les plus précises et présente quelques inconvénients. Il est équipé d'un filtre personnalisé qui ne correspond pas exactement à une bande astronomique ou photopique, mais qui présente une sensibilité accrue aux courtes longueurs d'onde (lumière bleue) (Cinzano, 2005). L'unité affichée n'est souvent pas compatible avec la définition astronomique standard de la magnitude, puisque la luminance est mesurée en $\text{mag}_{\text{SQM}}/\text{arcsec}^2$ au lieu de $\text{mag}_V/\text{arcsec}^2$. Les mesures des SQM disponibles dans le commerce ont une marge d'erreur de 10 %, ce qui correspond à $0,1 \text{ mag}_{\text{SQM}}/\text{arcsec}^2$ (Hänel et al., 2017).

4.2.2 Compteur de lumière à base de cellules solaires

Ce dispositif est extrêmement résistant aux intempéries et a été conçu à l'origine pour la surveillance à

long terme des émissions lumineuses. Il mesure le courant photoélectrique absorbé par la cellule solaire intégrée, ce qui permet d'estimer l'éclairement et le rayonnement d'un lieu spécifique. L'appareil est calibré automatiquement et de manière répétée en fonction du soleil, de la lune et du crépuscule sur place et ne nécessite donc pas de contrôle permanent. Étant donné que ce luxmètre est également capable de mesurer la lumière du jour, les séries chronologiques officielles de la recherche climatique et météorologique collectant des données sur l'irradiation totale peuvent être utilisées à des fins de comparaison et pour vérifier les mesures de l'instrument. Il s'agit d'un instrument populaire dans la communauté scientifique. Les photomètres à cellule solaire mesurent avec une précision de 10 μlx et le capteur peut couvrir toute la gamme de la perception humaine de la lumière (Hänel et al., 2017).

4.2.3 Luxmètre et luminancemètre

L'éclairement et la luminance peuvent être mesurés à l'aide d'appareils disponibles dans le commerce, tels que les luxmètres ou les luminancemètres. Il existe des produits dans différentes gammes de prix, qui se distinguent principalement par la précision de la mesure. Alors que les luxmètres sont peu coûteux et faciles à utiliser, la comparaison entre les mesures effectuées avec différentes marques est difficile en raison d'une forte dépendance aux paramètres environnementaux (Lübke et al., 2021)). Le principal inconvénient de la plupart de ces appareils est leur faible sensibilité dans des conditions de faible luminosité. Avec le luxmètre, les mesures sont déjà difficiles à réaliser pour des intensités lumineuses comprises entre 0,1 et 0,01 lux, et pour les luminancemètres, la limite inférieure se situe généralement entre 0,01 et 0,001 cd/m^2 . Le Digilum est un luminancemètre populaire qui est adapté photopiquement aux longueurs d'onde de la perception humaine. Il mesure la luminance de 0,1 mcd/m^2 à 20 kcd/m^2 avec une précision de 5 % (Hänel et al., 2017).

4.2.4 Appareils photo numériques avec objectif Fisheye/grand angle

Les appareils photo numériques dotés d'un objectif fisheye peuvent également être utilisés pour déterminer la luminance du ciel nocturne. Les avantages sont la facilité d'accès, le prix abordable et un effort de transport minimal. Cependant, la précision de la mesure dépend fortement de la procédure d'étalonnage (Jechow et al., 2017). Des images sombres (images avec une exposition minimale) sont utilisées pour minimiser les facteurs de confusion, ce qui permet de comparer les photos. La qualité des images dépend également du vignettage de l'objectif, de la distorsion géométrique des objectifs grand angle et de la sensibilité aux couleurs de l'appareil photo. Avec un étalonnage précis et une qualité élevée de l'appareil photo, il est possible d'obtenir une mesure d'une précision de 1 à 2 %. Normalement, il faut s'attendre à une erreur d'environ 10 % concernant la photométrie de la caméra (Hänel et al., 2017).

4.2.5 Compter les étoiles

La luminance provenant des zones fortement polluées par la lumière persiste dans le ciel et diminue le nombre d'objets célestes pouvant être détectés à l'œil nu. Par conséquent, le nombre d'étoiles visibles peut être utilisé comme indicateur du NSB. Le comptage des étoiles est un outil qui a été utilisé à plusieurs reprises pour collecter des données globales sur la pollution lumineuse par le biais de la science citoyenne. Plusieurs applications mobiles, telles que Dark Skies, Lost at night, Night Cities ou How Many Stars, sont utilisées et incitent le grand public à identifier les constellations d'étoiles. Ces données étant collectées de manière non systématique, la fiabilité de ces entrées suscite des interrogations (Hecker et al., 2018).

4.3 Méthodes haut de gamme

4.3.1 Imagerie satellite

Les images de la surface de la Terre prises depuis l'espace la nuit fournissent des informations sur la distribution spatiale des émissions lumineuses. Celles-ci peuvent être utilisées pour évaluer les changements dans l'espace et dans le temps. Jusqu'à présent, les données sur les émissions

lumineuses étaient collectées par deux capteurs satellitaires :

- a) De 1992 à 2013, les données proviennent du système OLS (Operational Linscan System) des satellites du programme de satellites météorologiques de la défense (DMSP/OLS) qui quantifient les émissions dans le visible et le proche infrarouge (VNIR) en "nombres numériques" (DN) allant de 0 à 63.
- b) De 2012 à aujourd'hui, les données ont été et sont toujours fournies par la bande jour/nuit (DNB) de la suite de radiomètres imageurs dans l'infrarouge visible (VIIRS) assemblant des mesures radiométriques des émissions lumineuses dans l'unité des nanowatts par centimètre carré par stéradian ($nW/cm^2/sr$).

Les deux instruments présentent un certain nombre de différences importantes et ne peuvent donc pas être utilisés directement pour évaluer les changements survenus entre 1992 et aujourd'hui. Alors que les images nocturnes globales fournies par le DMSP/OLS remontent le plus loin dans le temps et sont donc capables de montrer les fluctuations de la pollution lumineuse au fil du temps, VIIRS compile des données avec une résolution spatiale plus élevée. Le satellite du National Polar-orbiting Partnership qui pilote VIIRS orbite autour du globe 14 fois par jour et photographie la Terre avec une résolution de 15 secondes d'arc et d'environ 750 mètres. En comparaison, les mesures DMSP sont 40 à 90 fois moins bien résolues (Bennie et al., 2015). Cette amélioration de la résolution se traduit directement par une diminution de la taille des pixels sur les images VIIRS, ce qui signifie que les variations au sein du paysage capturé sont affichées avec plus de précision (Elvidge et al., 2017). En outre, les astronautes à bord de la Station spatiale internationale fournissent des photos à haute résolution. La NASA donne accès à ces images via "The Gateway to Astronaut Photography of Earth", qui sont toutefois moins pertinentes pour la communauté scientifique (Kyba et al., 2014). Les scientifiques qui utilisent l'imagerie satellitaire sont surtout intéressés à montrer l'évolution de la pollution lumineuse dans le temps avec les meilleures données disponibles. C'est pourquoi les données VIIRS ont été utilisées presque exclusivement pour la modélisation des huit dernières années. En outre, il existe une forte demande pour convertir les deux ensembles de données dans la même unité, de sorte que les valeurs d'émissions lumineuses des années 1990 puissent être comparées aux mesures d'aujourd'hui. Il existe deux ensembles de données combinant les données des deux sources de collecte, VIIRS et DMSP/OLS. D'abord les données harmonisées avec des mesures de 1992 à 2020, où toutes les données VIIRS ont été converties au système DMSP/OLS (Li et al., 2020) et ensuite les données étendues avec des données converties dans l'unité VIIRS couvrant la période 2000 - 2020 (Chen et al., 2021).

4.3.2 Spectroscopie

Les mesures spectroscopiques sont principalement obtenues dans des observatoires astronomiques internationaux et des installations de recherche. En général, un télescope ordinaire peut être équipé d'un spectrographe et d'une caméra disponible pour l'imagerie et la spectroscopie à basse résolution, qui quantifient les NSB dans les longueurs d'onde visibles. Pour la spectroscopie, les objets célestes sont observés pendant 30 minutes à une heure lors des nuits claires sans lune. Ensuite, la partie nocturne de la lumière du ciel peut être extraite du spectre stellaire, ce qui permet d'identifier si les lignes d'émission proviennent de sources lumineuses artificielles ou naturelles. Chaque source lumineuse a une longueur d'onde unique sur le spectre, ce qui permet d'identifier les émissions les plus problématiques à l'origine de la pollution lumineuse et rend donc les mesures spectroscopiques très précieuses. Les analyses quantitatives peuvent en outre montrer les changements de luminosité au fil du temps (Liu et al., 2020).

4.3.3 Moniteur de transmission tous azimuts (ASTMON)

Seuls quelques ASTMON ont été installés dans des observatoires du monde entier à des fins scientifiques, dans le but de déterminer la qualité du ciel nocturne. Ces appareils ont été conçus pour résister à des conditions météorologiques extrêmes et sont capables de surveiller en permanence la luminosité de surface de l'ensemble du ciel nocturne. Il fonctionne de manière entièrement automatique et peut donc être utilisé comme station de surveillance permanente à l'extérieur. Un algorithme de détection des sources est appliqué aux données collectées, ce qui permet de synchroniser les différentes

images grâce à la cartographie des étoiles. Les émissions lumineuses totales sont estimées sur la base de la luminosité des étoiles détectées. Les informations acquises peuvent être utilisées pour dériver la distribution géographique de la pollution lumineuse, de la couverture nuageuse ou de l'extinction atmosphérique multi bande à n'importe quel endroit (Aceituno et al., 2018). En plus des mesures de luminance dans l'unité typique $\text{mag}_v/\text{arcsec}^2$, l'ASTMON collecte également des données dans plusieurs autres longueurs d'onde (Hänel et al., 2017).

4.3.4 Mosaïque du ciel

Cette méthode peut également être utilisée pour mesurer les émissions lumineuses sur une grande surface au lieu de mesures ponctuelles locales. Plusieurs images successives à grand champ sont prises. En seulement vingt minutes, les émissions lumineuses de l'ensemble du ciel peuvent être cartographiées. Afin d'effectuer une mesure précise, cet instrument doit également être étalonné à l'aide d'étalons officiels. Comme il s'agit à nouveau d'une approche de mesure photopique, les données sont collectées en unités de cd ou de lux. Pour une mesure de la densité lumineuse d'une mosaïque couvrant l'ensemble du ciel, on peut s'attendre à une erreur de l'ordre du $\mu\text{cd}/\text{m}^2$. Il existe dans le commerce de petits ordinateurs portables dotés du logiciel nécessaire pour réaliser des mosaïques de l'ensemble du ciel. Toutefois, ces systèmes sont le plus souvent utilisés pour la surveillance à distance de sites d'intérêt spécifiques. La faible résolution est un défaut important des mosaïques de l'ensemble du ciel, mais la grande taille des pixels permet des temps de traitement rapides par image (Hänel et al., 2017).

4.4 Seuils et indicateurs de suivi

Plusieurs tentatives ont été faites pour quantifier la luminance d'un site vraiment sombre, où toute lumière artificielle est absente. Cependant, comme décrit précédemment, le ciel nocturne n'est jamais vraiment sombre en raison des sources de lumière naturelle et même des niveaux de luminance aussi faibles peuvent être mesurés en $\text{mag}/\text{arcsec}^2$. On estime généralement que la luminosité de fond du ciel lors d'une nuit sans lune est de $22 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ et qu'il s'agit de la valeur la plus faible mesurée lors de l'évaluation du NSB (Falchi et al., 2016). Une étude portant sur la précision de cette valeur en mesurant le NSB dans plusieurs sites protégés autour du globe a révélé que cette mesure variait et a suggéré que $22,7 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ était la meilleure estimation de la luminosité naturelle du ciel nocturne (Alarcon et al., 2021). D'autres études ont montré que le NSB fluctue dans une fourchette de $2,7 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ (Hänel et al., 2018 ; Posch et al., 2018). Lors de l'étude du NSB à différents endroits dans les montagnes polonaises, les niveaux de luminance se situaient entre $0,27$ et $1,71 \text{ mcd}/\text{m}^2$, cette fois évalués en millicandela par mètre carré (Sciezor et al., 2012). En 2001, John E. Bortle a proposé une méthode pour évaluer la qualité du ciel nocturne en classant les niveaux de luminance mesurés en neuf catégories, également connues sous le nom d'échelle de Bortle. Les valeurs sont disponibles en tant que magnitude limite à l'œil nu (NELM) et sont censées fournir aux astronomes des informations sur la visibilité céleste. Un site dont les mesures sont supérieures à 7 NELM est qualifié de "site typique vraiment sombre", ce qui correspond à $22,4 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ (Bortle, 2001).

Les seuils de pollution lumineuse sont des outils courants pour contrôler les émissions lumineuses. Cependant, les réglementations formulées par les différents pays varient en ce qui concerne la façon dont les émissions lumineuses sont mesurées, le type d'installations d'éclairage pour lesquelles des limites sont définies ou les niveaux de luminance autorisés. Comme premier exemple, les Français ont inclus des mesures strictes dans leur politique réglementant les niveaux de luminance de l'éclairage extérieur en fonction du niveau d'urbanité d'un lieu donné. Les émissions lumineuses sont mesurées en lumen par mètre carré et trois seuils ont été définis (arrêté français, 2018). La Corée est un autre pays qui a formulé des normes d'éclairage différentes en fonction de la valeur environnementale d'une région donnée. Chaque région a été divisée en zones environnementales, la plus basse étant celle qui abrite les espèces les plus sensibles à la lumière ou les écosystèmes les plus précieux, et donc le seuil de luminance le plus strict. En plus de la définition de quatre zones environnementales, des extinctions nocturnes strictes avec une tolérance d'émission lumineuse plus faible sont appliqués. Le tableau 4 énumère les seuils de luminance maximale autorisée pour les feux de route dans la période d'une heure après le coucher du soleil et avant le lever du soleil (Lim et al., 2018). Les décideurs politiques croates ont utilisé une

stratégie similaire. Toutes les régions ont été divisées en cinq zones d'éclairage : E0 sont des zones avec un ciel nocturne immaculé et uniquement de la lumière naturelle, E1 sont des paysages sombres qui sont minimalement éclairés artificiellement, E2 sont des zones avec de faibles niveaux d'éclairage artificiel, E3 définit des zones avec un éclairage artificiel moyen et E4 sont des zones avec des niveaux élevés d'éclairage artificiel. Pour chaque zone, un niveau d'éclairage vertical maximal a été défini, qui varie en fonction de l'installation d'éclairage. Le tableau 4 présente un exemple de limites formulées pour les éclairages de sécurité dans les bâtiments privés (Ministère de l'économie et du développement durable, 2020).

D'autre part, les politiques italiennes sont spécifiquement formulées pour certains types d'installations d'éclairage et formulées dans l'unité de candela par kilo lumen. Comme indiqué précédemment, ces réglementations varient entre les différentes régions d'Italie et nous donnons donc un exemple de la pollution lumineuse régionale de la région du Lazio (Consiglio regionale, 2000). Ces divergences démontrent la nécessité d'harmoniser les réglementations visant à limiter la pollution lumineuse dans l'ensemble de l'UE afin de faciliter les comparaisons.

Tableau 4.1 : Seuils politiques d'émission lumineuse

Type d'installation lumineuse/zone éclairée : le seuil est défini pour	Niveau de seuil défini dans la politique (unité)	Pays	Référence
Astronomie/écologie zones de valeur	20 (lm/m) ²	France	(Ministre de la transition écologique et solidaire, 2018))
Zones rurales	25 (lm/m) ²	France	(Ministre de la transition écologique et solidaire, 2018))
Zones urbaines	35 (lm/m) ²	France	(Ministre de la transition écologique et solidaire, 2018))
Zone E1	50 (cd/m) ²	Corée	(Lim et al., 2018)
Zone E2	400 (cd/m) ²	Corée	(Lim et al., 2018)
Zone E3	800 (cd/m) ²	Corée	(Lim et al., 2018)
Zone E4	1000 (cd/m) ²	Corée	(Lim et al., 2018)
Zone E0 (au lever ou au coucher du soleil/la nuit)	0,5 (lx) / 0 (lx)	Croatie	(Ministère de l'économie et du développement durable, 2020)
Zone E1 (au lever ou au coucher du soleil) la nuit)	1 (lx) / 0 (lx)	Croatie	(Ministère de l'économie et du développement durable Développement, 2020)
Zone E2 (au lever ou au coucher du soleil / la nuit)	2 (lx) / 0,5 (lx)	Croatie	(Ministère de l'économie et du développement durable, 2020)
Zone E3 (au lever ou au coucher du soleil / la nuit)	3 (lx) / 1 (lx)	Croatie	(Ministère de l'économie et du développement durable, 2020)
Zone E4 (au lever ou au coucher du soleil) la nuit)	8 (lx) / 2 (lx)	Croatie	(Ministère de l'économie et du développement durable Développement, 2020).
Bâtiments privés	1 (cd/klm)	Italie, région du Latium	(Consiglio regionale, 2000)
Lampes de rue, lanternes	5 (cd/klm)	Italie, Lazio région	(Consiglio regionale, 2000)
Projecteurs, projecteurs	10 (cd/klm)	Italie, région du Latium	(Consiglio regionale, 2000)
Lumières ornementales	35 (cd/klm)	Italie, région du Latium	(Consiglio regionale, 2000)

Des seuils écologiques ont été formulés pour évaluer les niveaux de pollution lumineuse dans les zones écologiques des sites Natura 2000 terrestres et aquatiques sur la base des données nocturnes VIIRS (Hügli, 2021). Le seuil proposé de 2 nW/cm²/sr dans le tableau 4 correspond à un niveau d'émission lumineuse typique pour les petits villages ou les zones résidentielles peu peuplées. Des valeurs de luminance de 10 nW/cm²/sr sont courantes dans les grandes villes où la population est assez dense. Dans les grandes agglomérations, où des installations d'éclairage mixtes sont utilisées, les mesures se situent généralement autour de 20 nW/cm²/sr. Les émissions lumineuses supérieures à 2 nW/cm²/sr devraient avoir un impact sur les écosystèmes et leur faune, au moins dans une faible mesure. Le seuil le plus bas de 0,5 nW/cm²/sr a été proposé parce que les émissions lumineuses autour de ce niveau proviennent de sources lumineuses artificielles avec une puissance d'éclairage minimale si faible qu'une distinction avec la lumière nocturne naturelle provenant de la lune et des étoiles devient difficile et est associée à l'incertitude (Hale et al., 2018 ; Hale & Arlettaz, 2019 ; Hügli, 2021).

Tableau 4.2 : Seuils de classification des émissions lumineuses écologiques (extrait de Hügli 2021)

Émission lumineuse (nW/cm ² /sr)	Description des seuils d'émission lumineuse	Référence
< 0.5	Valeurs d'émission lumineuse les plus faibles	(Hügli, 2021)
0.5 - 2*	Très faibles valeurs d'émission de lumière	(Hügli, 2021)
2 - 10	Faibles valeurs d'émission de lumière	(Hale & Arlettaz, 2019)
10 - 20	Valeurs moyennes d'émission de lumière	(Hale & Arlettaz, 2019)
> 20	Valeurs d'émission lumineuse élevées	(Hale & Arlettaz, 2019)

*Pour des émissions lumineuses supérieures à 2 nW/cm²/sr, on s'attend à ce que les impacts écologiques soient au moins faibles. Source : Hale et al, 2018.

Actuellement, la communauté des chercheurs développe de nouveaux indicateurs pour surveiller la pollution lumineuse. Afin de faciliter la définition des valeurs maximales d'émissions lumineuses pour les décideurs politiques, les futurs indicateurs à haute résolution géographique établiront un lien direct avec des sources d'émissions spécifiques (Bará et al., 2021, 2022 ; Falchi & Bará, 2021).

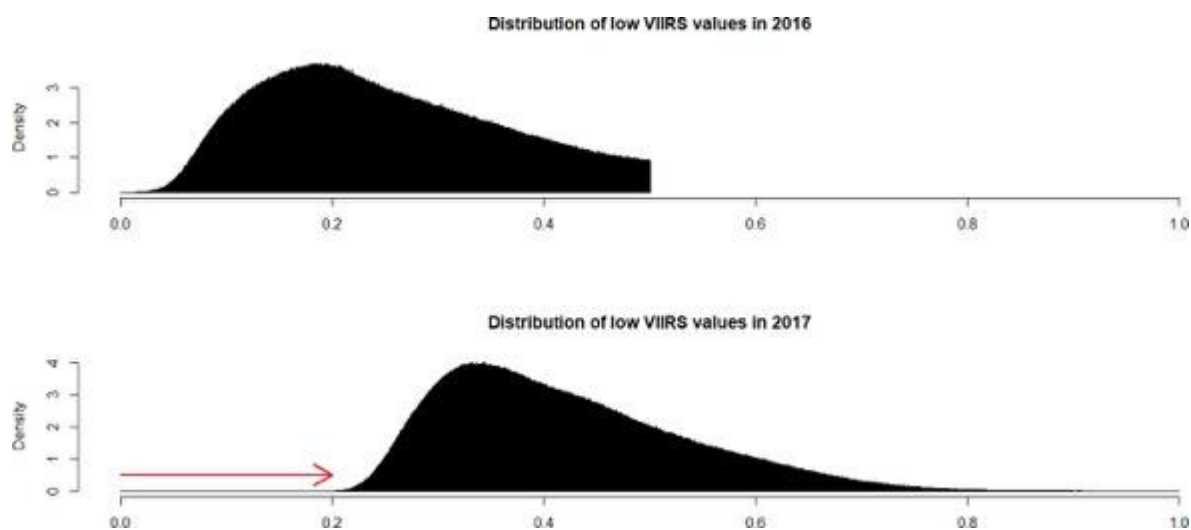
5 Tendances temporelles de la pollution lumineuse

5.1 Tendances les plus récentes

Les images composites de radiance moyenne mensuelle des données nocturnes de VIIRS ont été utilisées pour montrer les derniers développements des émissions lumineuses à travers l'Europe. En particulier, le produit Stray Light Corrected Night-time Day/Night Band Composites Version 1 (Elvidge et al., 2013, 2017) couvrant les années 2014 - 2021 a été consulté via l'API de Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). Ce produit est une configuration alternative du DNB VIIRS utilisant une procédure de correction de la lumière parasite. La procédure de correction étend les zones visibles plus près des pôles et améliore la gamme dynamique. Ce produit exclut les données affectées par la couverture nuageuse. La source de données mesure la lumière émise par la surface de la terre dans l'espace sous forme de radiance en unités de $\text{nW/cm}^2/\text{sr}$. Nous avons choisi des seuils pour quantifier les émissions de lumière artificielle, comme indiqué dans le tableau 4. Étant donné que les valeurs converties à partir des mesures de luminance se sont avérées extrêmement faibles et associées à des incertitudes dépendant des conditions météorologiques, de l'étalonnage et des facteurs de conversion, l'analyse a été réalisée en utilisant les seuils disponibles dans l'unité de VIIRS (Hale et al., 2018 ; Hale & Arlettaz, 2019 ; Hügli, 2021).

Les données analysées de la bande jour/nuit corrigée de la lumière parasite, recueillies par le satellite VIIRS, ont été recalibrées en janvier 2017 (A. Sánchez de Miguel, communication personnelle, 26 octobre 2022). La figure 5.1 compare la distribution des valeurs VIIRS dans les zones où les mesures étaient inférieures ou égales à $0,5 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ en 2016 et les valeurs dans les mêmes zones en 2017. Un décalage de $+0,2 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ est visible, en particulier dans les zones où les émissions lumineuses sont extrêmement faibles, ce qui indique un changement dans la méthode de mesure et la production des données. Pour corriger ce recalibrage, la valeur artificielle de $0,2 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ a été soustraite de toutes les valeurs d'émissions lumineuses à partir de janvier 2017.

Figure 5.1 : Comparaison de la densité des valeurs moyennes dans les zones européennes avec des mesures d'émissions lumineuses $\leq 0,5 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ (collectées en 2016) pour 2016 et 2017.



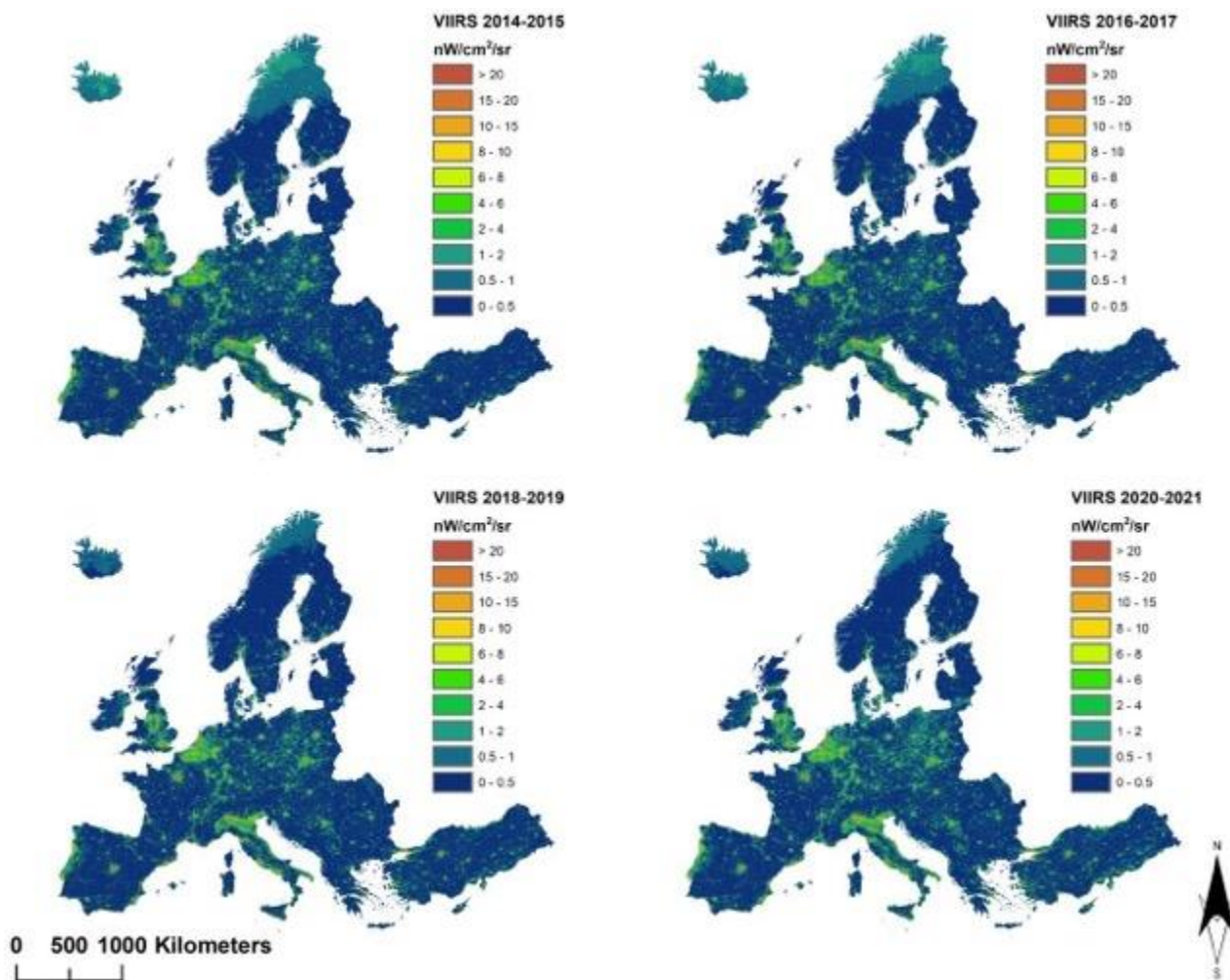
Note : Densité des mesures en pixels avec des niveaux d'émission lumineuse moyens $\leq 0,5 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ en 2016 (panneau supérieur) et le décalage pour les valeurs moyennes dans les mêmes pixels en 2017 (panneau inférieur).

Source : Swiss TPH : Swiss TPH.

La figure 5.2 montre les moyennes sur deux ans des niveaux d'exposition à la lumière résultant de la grille (à une résolution spatiale de $500 \times 500 \text{ m}^2$) couvrant les 38 pays de l'EEE au cours des huit dernières années. La plupart des émissions lumineuses se situent entre 2 et $6 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$, ce qui est

typique des zones rurales et suburbaines peu peuplées. Des niveaux extrêmement élevés de 20 à 35 $nW/cm^2/sr$ peuvent être identifiés dans les grandes villes telles que Paris, Londres ou Berlin. La comparaison des quatre périodes montre une tendance à l'augmentation des émissions lumineuses totales, en particulier dans les faibles niveaux.

Figure 5.2 : Comparaison des émissions lumineuses moyennes sur deux ans en Europe entre 2014 et 2021

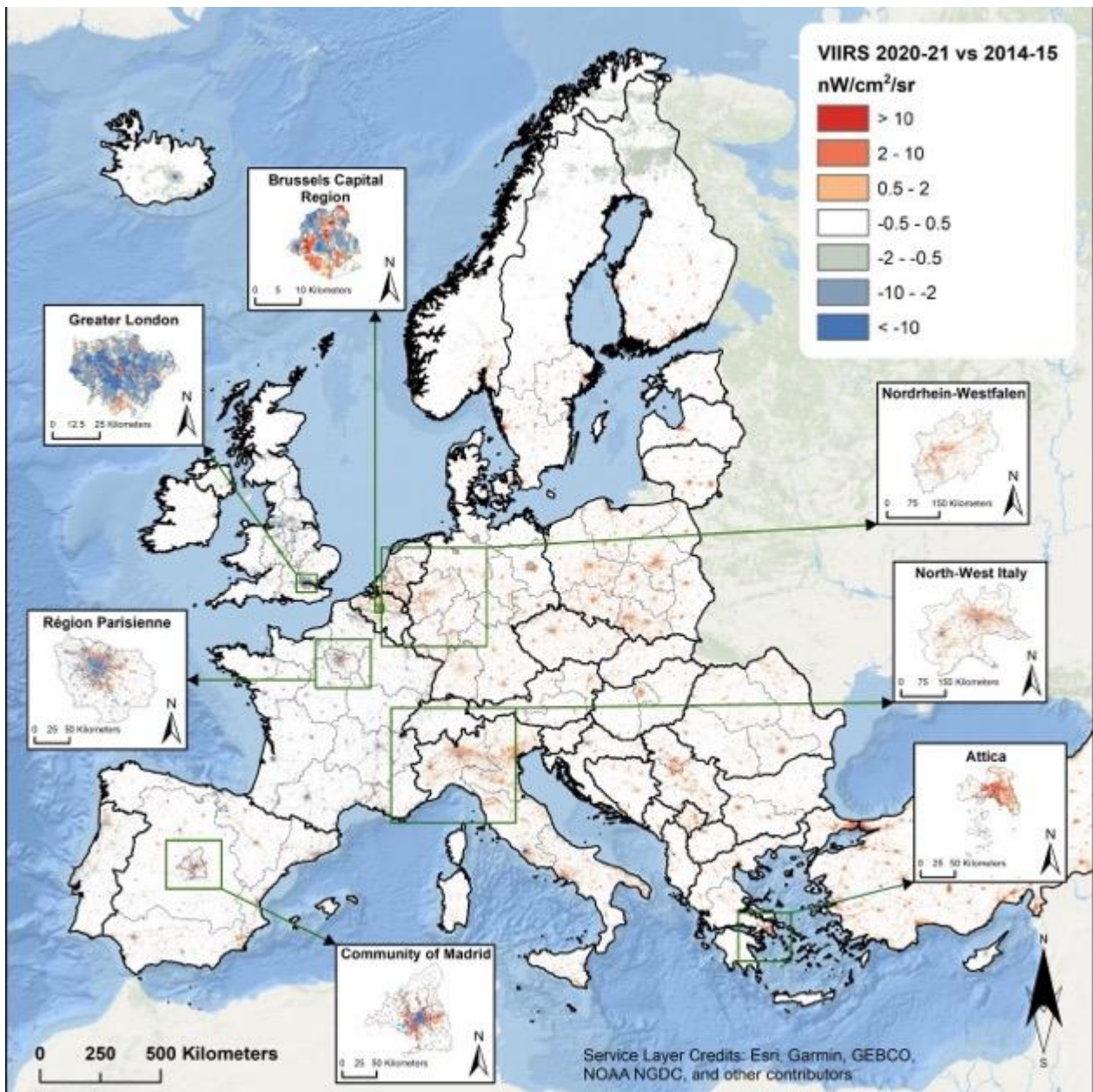


Note : Moyennes sur deux ans des émissions lumineuses dans les pays de l'EEE38 au cours des huit dernières années (2014/15 : panneau supérieur gauche, 2016/2017 : panneau supérieur droit, 2018/19 : panneau inférieur gauche, 2020/21 : panneau inférieur droit). La légende indique les seuils d'émissions lumineuses en $nW/cm^2/sr$. Les cartes ont été produites à partir de données satellitaires obtenues grâce à la suite de radiomètres imageurs dans le visible et l'infrarouge (VIIRS), qui rassemblent des mesures radiométriques des émissions lumineuses.

Source : Swiss TPH : Swiss TPH.

La figure 5.3 illustre les différences de luminosité entre la dernière (2020/21) et la première (2014/15) période de calcul de la moyenne (dans la figure 5.2) pour chaque pixel de $500 \times 500 \text{ m}^2$ en Europe. Elle quantifie le changement net de l'exposition lumineuse anthropique de la surface terrestre en Europe au cours des huit dernières années. Les différences entre les régions rurales et urbaines sont évidentes. Une fois de plus, les régions d'Europe de l'Est affichent des tendances à l'augmentation de la pollution lumineuse, tandis que l'évolution des émissions lumineuses est plutôt neutre en France, en Espagne et au Portugal. L'évolution des émissions lumineuses au cours des huit dernières années dans les centres densément peuplés tels que Madrid, Bruxelles ou Londres indique un mélange de taches avec des niveaux de luminosité croissants et décroissants.

Figure 5.3 : Différences de luminosité dans l'EEE38 entre les périodes de calcul de la moyenne (2020/21) et (2014/15)



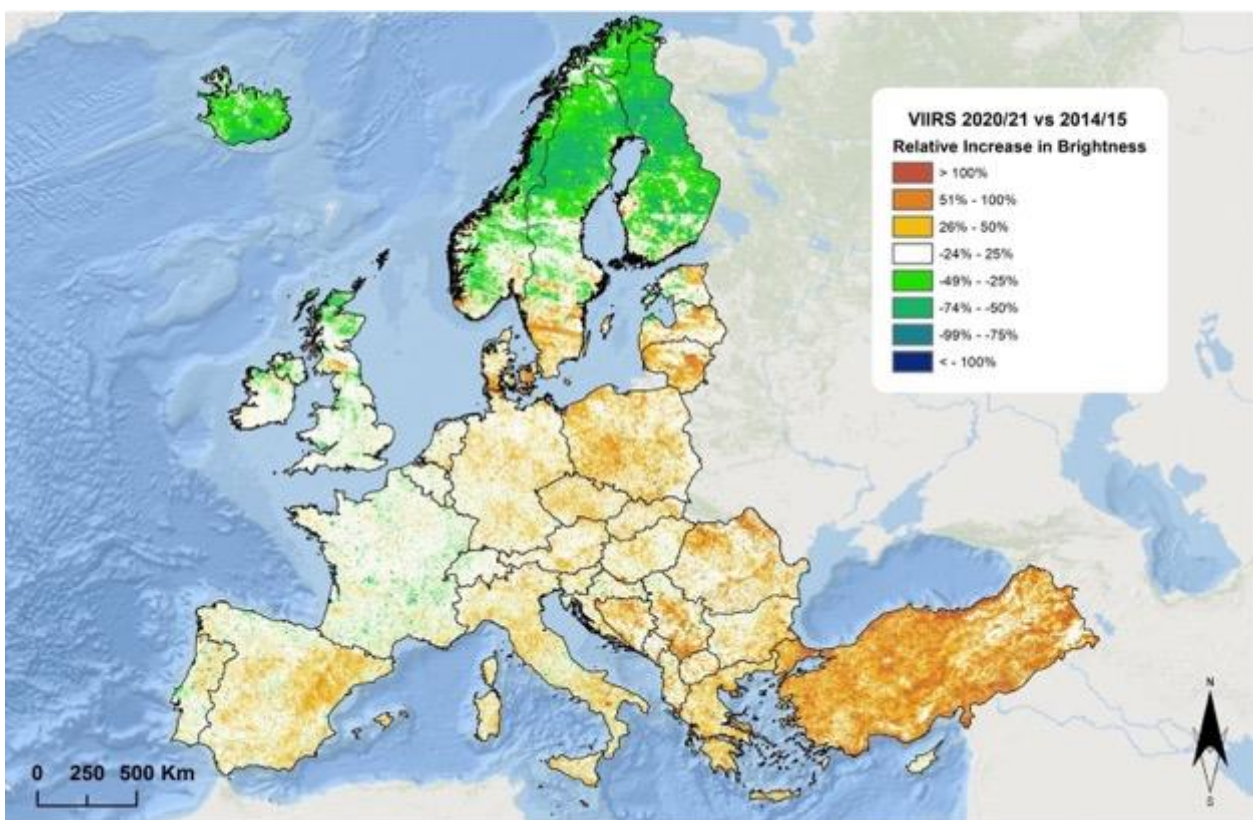
Note : évolution de la luminosité en Europe au cours des huit dernières années, calculée comme la différence entre les émissions lumineuses moyennes en 2014/15 et en 2020/21. Les valeurs d'augmentation (couleur rouge) ou de diminution (couleur bleue) de la lumière artificielle varient entre 0,5 et 10 nW/cm²/sr. La couleur blanche indique qu'il n'y a pas de changement (c'est-à-dire que les différences sont inférieures à +/- 0,5 nW/cm²/sr). Les zones zoomées représentent certaines des subdivisions de niveau 1 de la nomenclature des unités territoriales statistiques (NUTS 1) de l'Union européenne.

Source : Swiss TPH : Swiss TPH.

La figure 5.4 montre l'augmentation relative (en %) de la luminosité en Europe au cours des huit dernières années ; l'augmentation relative de plus de 25 % est représentée par les couleurs jaune-rouge et la diminution relative de plus de -25 % par les couleurs vert-bleu. La couleur blanche indique l'absence de changement (c'est-à-dire les changements relatifs inférieurs à +/- 25 %). Une grande partie du continent a connu une augmentation relative de la luminosité supérieure à 100 %, ce qui signifie que les niveaux de pollution lumineuse ont plus que doublé. Ces informations doivent être interprétées conjointement avec les différences absolues présentées dans la figure 5.3, car ces changements peuvent ne pas sembler importants dans les zones où les émissions sont initialement faibles. Cependant, ils indiquent clairement une tendance à la hausse sur la majeure partie du continent européen. Une

tendance à la baisse de la pollution lumineuse est évidente pour les régions de France et du Royaume-Uni. Comme nous l'avons expliqué précédemment des politiques adaptées de régulation des émissions lumineuses ont été récemment adoptées dans ces pays, ce qui pourrait expliquer l'évolution du signal lumineux au cours des huit dernières années. Une diminution relative encore plus forte des émissions lumineuses est enregistrée aux latitudes plus élevées de l'Europe. Cependant, ceci est lié au fait que les données d'émissions lumineuses nocturnes collectées par le satellite VIIRS sont perturbées par la radiance des aurores réfléchiée par la surface de la Terre, comme expliqué dans la section 7.1.2. Ceci est particulièrement problématique dans les régions où les niveaux d'émission lumineuse sont extrêmement faibles, dans la gamme inférieure à 1 nW/cm²/sr, où une fausse impression de diminution de la pollution lumineuse est créée. Par conséquent, la diminution indiquée des émissions lumineuses en Europe du Nord peut être attribuée à un phénomène naturel plutôt qu'à une diminution des émissions lumineuses artificielles. Au contraire, les tendances observées dans le reste de l'Europe peuvent s'expliquer par des changements réels dans la quantité d'éclairage artificiel.

Figure 5.4 : Augmentation relative de la luminosité dans l'EEE38 entre les périodes de calcul de la moyenne (2020/21) et (2014/15)



Note : Augmentation relative (%) de la luminosité en Europe au cours des huit dernières années, calculée comme suit : $RI_{2020/21-2014/15} (\%) = 100 \times \frac{VIIRS_{2020/21} - VIIRS_{2014/15}}{VIIRS_{2014/15}}$.

L'augmentation relative supérieure à 25 % est représentée par des couleurs jaune-rouge et la diminution relative supérieure à -25 % par des couleurs vert-bleu. La couleur blanche indique l'absence de changement (c'est-à-dire les changements relatifs inférieurs à +/- 25 %).

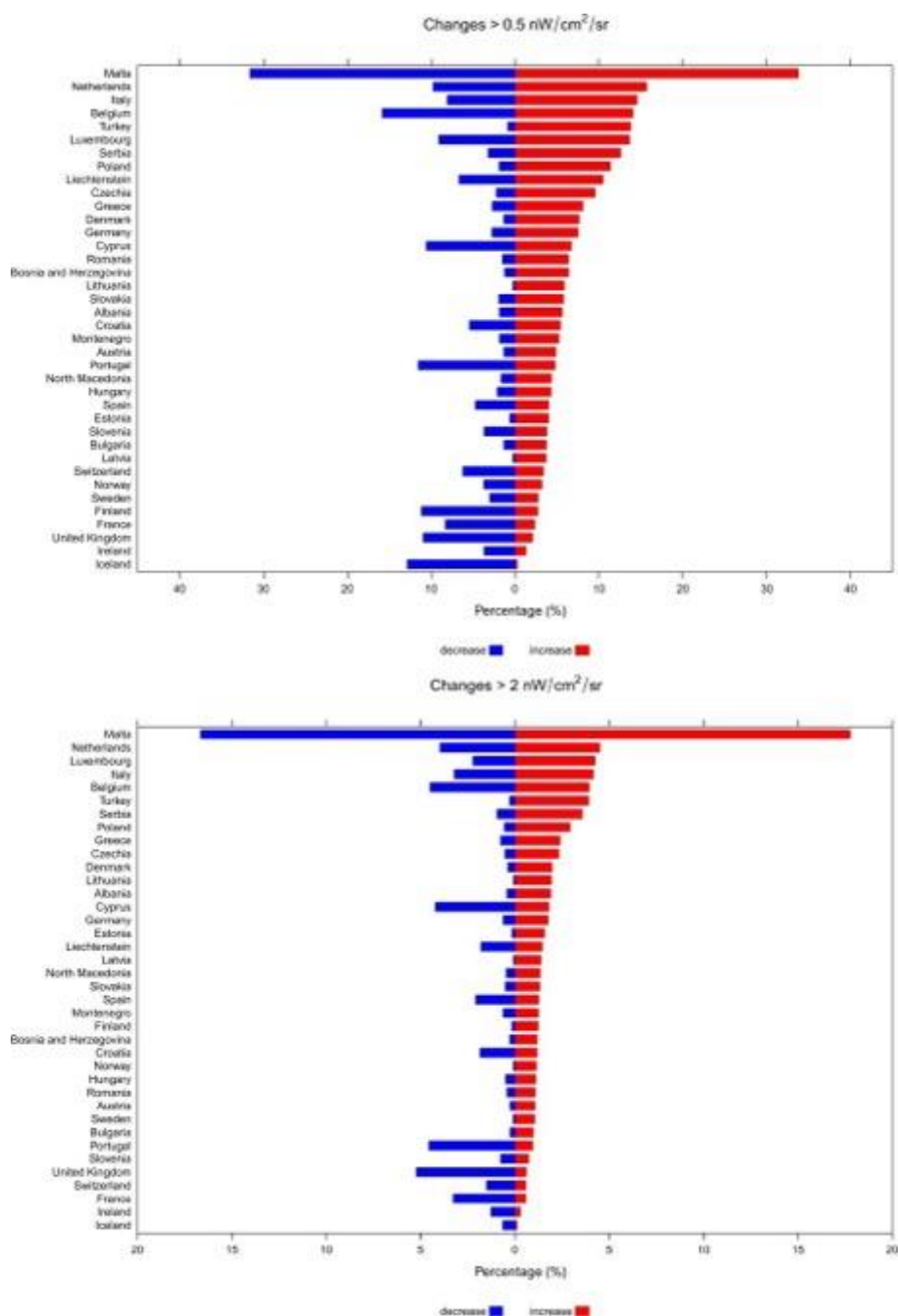
Source : Swiss TPH : Swiss TPH.

5.2 Comparaison des pays de l'EEE

La figure 5.5 illustre les différences nationales entre la première (2014/2015) et la dernière (2020/21) périodes de calcul de la moyenne en utilisant deux niveaux de seuil présentés dans le tableau 4.2. Le pourcentage de la surface terrestre dont la luminosité augmente ou diminue dans chacun des 38 pays de l'EEE a été quantifié pour 2 nW/cm²/sr (panneau supérieur) et 0,5 nW/cm²/sr (panneau inférieur). Les Pays-Bas, le Luxembourg, la Pologne et la Belgique figurent parmi les pays qui ont connu la plus forte

augmentation de la luminosité au cours des huit dernières années. Une réduction de la pollution lumineuse a été constatée en Islande, en Irlande et en France pour les deux seuils analysés. Comme nous l'avons vu précédemment, le cadre juridique français réglementant la pollution lumineuse est progressif et strict par rapport à d'autres pays européens, ce qui peut avoir contribué à la tendance à la baisse. Un autre exemple intéressant est celui de Malte, où la quasi-totalité de la surface terrestre a connu une modification des émissions lumineuses au cours des huit dernières années. Alors qu'environ 32 % de la surface terrestre maltaise a connu une baisse de luminosité, jusqu'à 35 % de la zone est devenue plus lumineuse. Si l'on compare à nouveau les deux seuils, il est évident que l'augmentation la plus importante de la luminosité artificielle s'est produite au niveau d'émission lumineuse le plus bas, à savoir 0,5 nW/cm²/sr. Les valeurs numériques exactes de l'augmentation de la luminosité par pays sont représentées dans le tableau 5.1, ce qui permet d'illustrer les différentes tendances observées en Europe.

Figure 5.5 : Variation de la surface des terres en termes de luminosité entre les périodes 2014/15 et 2020/21 - Comparaison par pays



Note : Les barres horizontales indiquent le pourcentage de la surface totale des terres dans chaque pays pour lequel la

lumière artificielle a augmenté (rouge) ou diminué (bleu) d'au moins 2 nW/cm²/sr (panneau supérieur) ou d'au moins 0,5 nW/cm²/sr (panneau inférieur) entre 2014/15 et 2020/21.

Source : Swiss TPH.

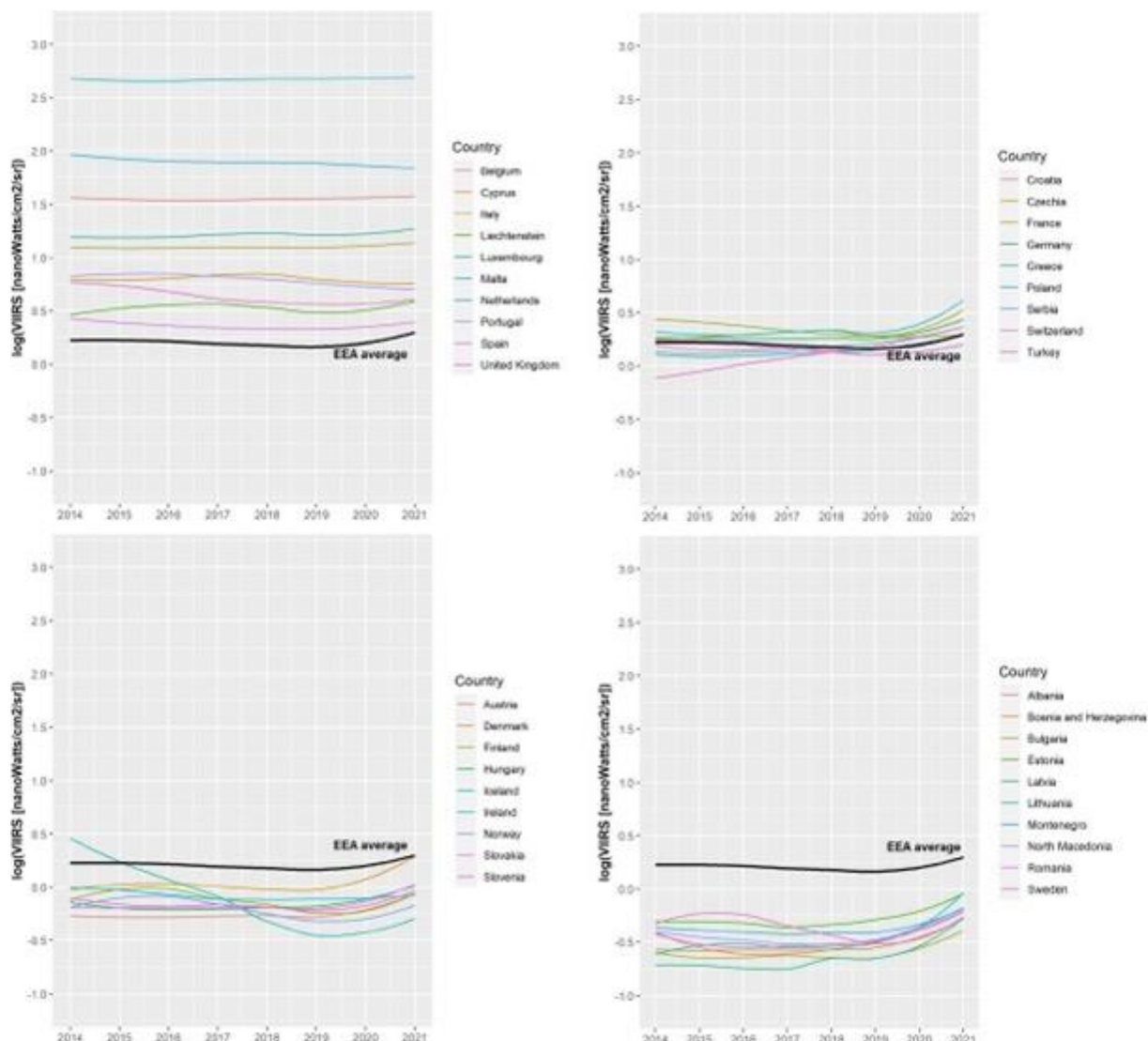
Tableau 5.1 : Valeurs numériques de la variation de la surface des terres en termes de luminosité entre les périodes 2014/15 et 2020/21 - Comparaison par pays

Pays	Augmentation de la surface de > 0,5 nW/cm ² /sr (%)	Diminution de la surface de > 0,5 nW/cm ² /sr (%)	Augmentation surfacique de > 2 nW/cm ² /sr (%)	Diminution de la surface de > 2 nW/cm ² /sr (%)
Albanie	5.6	1.9	1.9	0.4
Autriche	4.9	1.3	1.0	0.3
Belgique	14.0	15.8	3.9	4.5
Bosnie et Herzégovine	6.3	1.2	1.2	0.3
Bulgarie	3.7	1.3	1.0	0.3
Croatie	5.4	5.4	1.2	1.8
Chypre	6.7	10.6	1.8	4.2
République tchèque	9.5	2.2	2.3	0.5
Danemark	7.6	1.3	2.0	0.4
Estonie	4.0	0.6	1.5	0.2
Finlande	2.7	11.2	1.2	0.2
France	2.3	8.3	0.6	3.3
Allemagne	7.5	2.8	1.7	0.6
Grèce	8.1	2.7	2.4	0.8
Hongrie	4.3	2.1	1.1	0.5
Islande	0.3	12.9	0.1	0.6
Irlande	1.3	3.7	0.3	1.3
Italie	14.5	8.1	4.1	3.2
Lettonie	3.6	0.2	1.4	0.1
Liechtenstein	10.5	6.7	1.4	1.8
Lituanie	5.8	0.2	1.9	0.1
Luxembourg	13.6	9.1	4.2	2.2
Malte	33.8	31.6	17.8	16.7
Monténégro	5.2	1.9	1.2	0.6
Pays-Bas	15.7	9.8	4.5	4.0
Nord Macédoine	4.3	1.7	1.3	0.5
Norvège	3.2	3.7	1.1	0.1
Pologne	11.3	1.9	2.9	0.6
Portugal	4.8	11.5	0.9	4.6
Roumanie	6.4	1.5	1.1	0.4
Serbie	12.6	3.2	3.6	1.0
Slovaquie	5.8	1.9	1.3	0.5
Slovénie	3.7	3.7	0.7	0.8
Espagne	4.0	4.7	1.2	2.1
Suède	2.7	3.0	1.0	0.1
Suisse	3.3	6.2	0.6	1.5
Turquie	13.8	0.9	3.9	0.3
Royaume-Uni	2.1	10.9	0.6	5.2

La figure 5.6 montre l'évolution des émissions lumineuses moyennes (sur l'échelle logarithmique) dans

les pays de l'EEE38 au cours des huit dernières années (2014 - 2021). Le panneau supérieur gauche présente les neuf pays ayant les niveaux de pollution lumineuse les plus élevés (quantile supérieur de 25%) et le panneau inférieur droit présente les pays ayant les émissions lumineuses les plus faibles (quantile inférieur de 25 %). Une fonction de régression polynomiale locale (loess) (Cleveland et al. 1992) a été ajustée aux données d'émissions moyennes annuelles (transformées en logarithme) afin de comparer graphiquement les tendances temporelles.

Figure 5.6 : Moyenne annuelle des émissions lumineuses VIIRS pour la période 2014 - 2021



Note : Les émissions lumineuses moyennes annuelles (sur une échelle logarithmique) au cours de la période 2014-2021 ont été calculées pour chaque pays de l'EEE38 à partir des données mensuelles VIIRS à une résolution spatiale de 500 m². Une fonction de lissage par régression polynomiale locale (loess) a été ajustée aux données d'émissions moyennes annuelles (transformées en logarithme) afin de comparer graphiquement les tendances temporelles. Les pays ayant les émissions lumineuses les plus élevées (quantile supérieur de 25 %) sont indiqués dans le panneau supérieur gauche, les pays ayant les deuxièmes émissions lumineuses les plus élevées (quantile de 50 % - 75 %) dans le panneau supérieur droit, les pays ayant les deuxièmes émissions lumineuses les plus faibles (quantile de 25 % - 50 %) dans le panneau inférieur gauche et les pays ayant les émissions lumineuses moyennes les plus faibles (quantile inférieur de 25 %) ont été regroupés dans le panneau inférieur droit. La moyenne des émissions lumineuses de l'ensemble de la zone EEE38 est indiquée par une courbe noire en gras dans les quatre panneaux, à titre de référence.

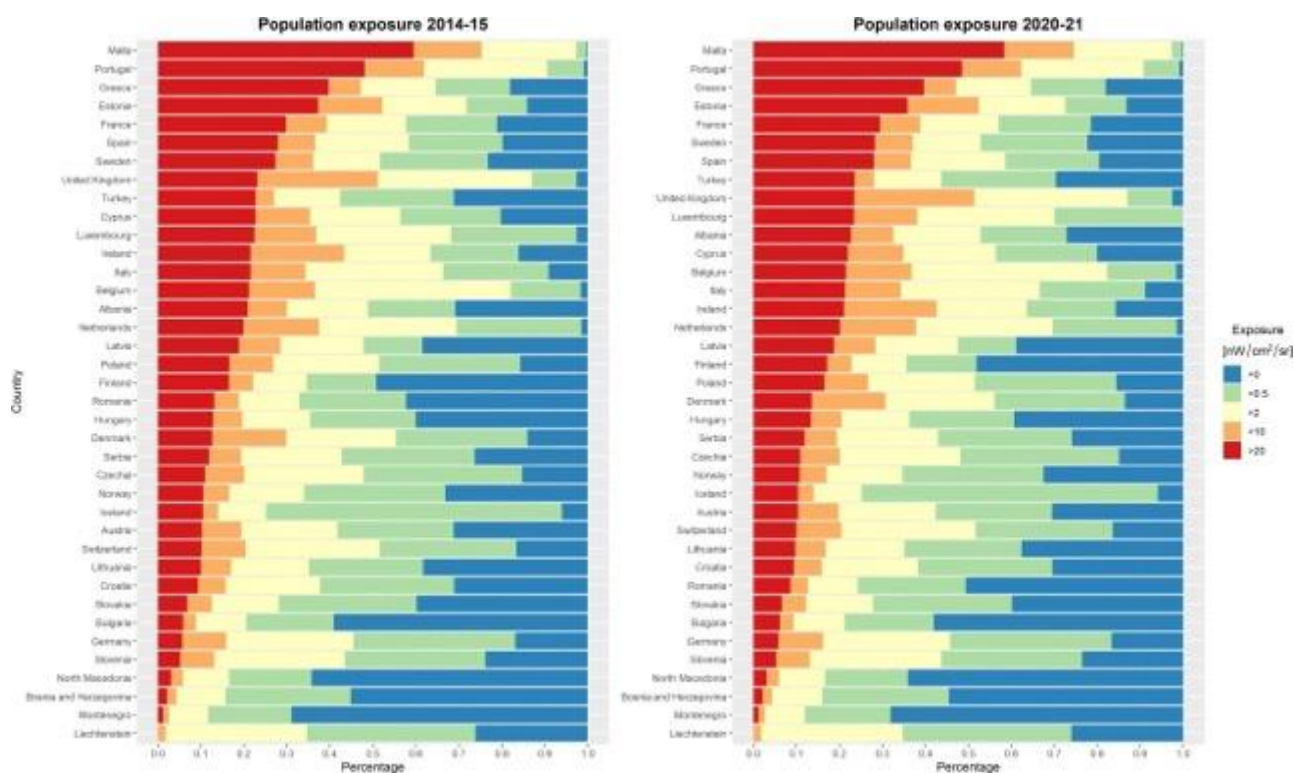
Source : Swiss TPH

En Europe, Malte arrive en tête avec la luminosité la plus élevée, suivie de près par les Pays-Bas et la Belgique. Cependant, il est important de mentionner que la taille d'un pays, la densité de la population et le niveau d'infrastructure sont des facteurs qui peuvent fortement influencer les émissions lumineuses

d'un pays ; par conséquent, les comparaisons directes ne sont pas évidentes. La moyenne des émissions lumineuses sur l'ensemble de la zone EEE38 (indiquée par une courbe noire en gras) peut servir de référence pour comparer les pays. Jusqu'en 2018, la Lettonie était le pays où les niveaux de pollution lumineuse étaient les plus bas, mais elle a maintenant dépassé la Bulgarie. Il est évident que les pays où la pollution lumineuse est la plus faible ont connu récemment les changements les plus importants en matière d'émissions. Alors que les courbes montrant l'évolution des émissions lumineuses des pays les plus émetteurs sont plutôt plates, une forte tendance à la hausse peut être observée pour les pays dont les niveaux d'émission sont les plus faibles. La tendance à la hausse de l'exposition lumineuse moyenne de l'EEE est également évidente, surtout après 2019.

La figure 5.7 montre la répartition des personnes exposées à différents niveaux d'émission lumineuse (>0 nW/cm²/sr, >0,5 nW/cm²/sr, >2 nW/cm²/sr, >10 nW/cm²/sr et >20 nW/cm²/sr) dans chaque pays de l'EEE38. Pour ce faire, nous avons superposé les données démographiques maillées de 2015 et 2020 (CIESIN, 2018) disponibles à une résolution spatiale de 1 km² avec les émissions lumineuses VIIRS en 2014/15 et 2020/21 agrégées à la même échelle spatiale et avons calculé pour chaque pays le pourcentage de personnes vivant dans des zones correspondant à chaque catégorie d'exposition. Alors que plus de 50 % de la population maltaise est exposée à des émissions lumineuses supérieures à 20 nW/cm² /sr, au Liechtenstein, au Monténégro ou en Bosnie, presque aucun citoyen n'est exposé à de tels niveaux de luminosité. Dans les pays urbanisés comme le Portugal, la Grèce ou la Suède, plus d'un tiers des citoyens sont exposés à un niveau relativement élevé de pollution lumineuse. Par rapport aux cartes de la figure 5.2 montrant l'évolution de l'exposition lumineuse de la surface terrestre au fil du temps (qui indiquent une tendance temporelle claire), les changements dans le pourcentage de personnes exposées à des émissions lumineuses élevées entre les deux périodes (2014/15 et 2020/21) sont moins prononcés. Cela peut indiquer que l'augmentation de la surface de la pollution lumineuse est principalement due à l'accroissement de la population mondiale et au développement des infrastructures qui y sont liées, et seulement dans une moindre mesure aux comportements excessifs de la société moderne en matière d'éclairage.

Figure 5.7 : Répartition du pourcentage de personnes exposées à différents niveaux d'émissions lumineuses dans chaque pays de l'EEE38 (2014/15 vs. 2020/21)



Note : Les barres horizontales indiquent le pourcentage de la population totale exposée à différents seuils de lumière artificielle (> 20 nW/cm² /sr - rouge, > 10 nW/cm² /sr - orange, > 2 nW/cm² /sr - jaune, > 0,5 nW/cm² /sr - vert, > 0 nW/cm² /sr - bleu) au cours des deux périodes 2014/15 (panneau de gauche) et 2020/21 (panneau de

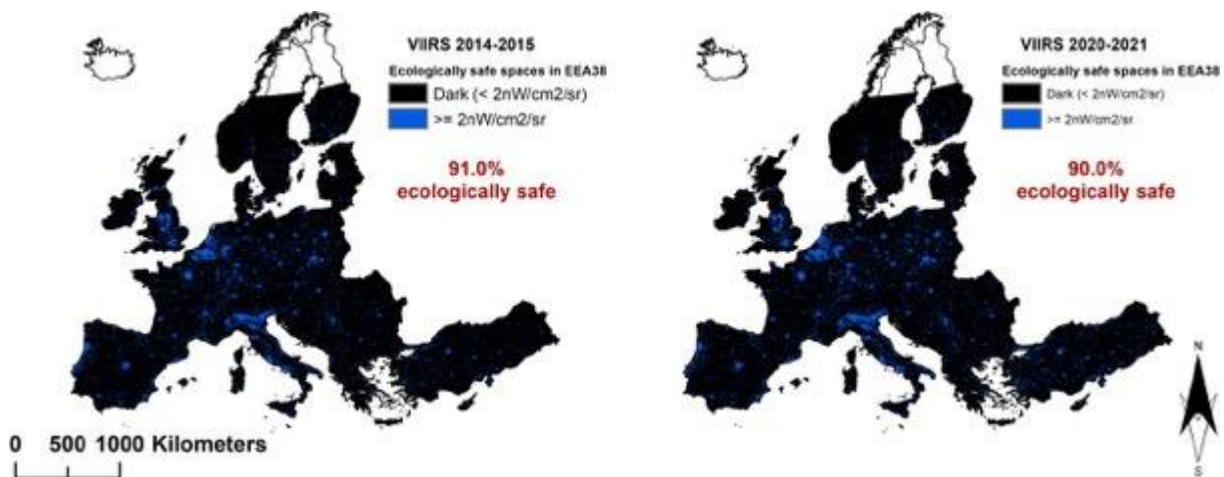
droite) par pays.
Source : Swiss TPH.

5.3 Signaux captant les changements liés à la pollution lumineuse

Les seuils présentés dans la section 4.4 ont été utilisés pour développer des signaux reflétant les changements de la pollution lumineuse en Europe. En particulier, deux signaux ont été développés. Un signal est basé sur le seuil de 2 nW/cm²/sr, qui sert d'indicateur de la pollution lumineuse écologique. L'exposition à la lumière artificielle au-delà de cette limite devrait avoir au moins un léger impact écologique. Le deuxième signal est basé sur le seuil de 0,5 nW/cm²/sr, qui est utilisé comme indicateur des zones présentant des conditions de lumière naturelle, car dans cette fourchette, l'exposition à la lumière est qualifiée d'extrêmement faible et la distinction entre les sources de lumière naturelle et artificielle n'est plus fiable. Dans les quatre cartes présentées dans les figures 5.7 et 5.8, les zones situées en dessous de l'un ou l'autre seuil sont représentées en noir, tandis que la surface terrestre affectée par des émissions lumineuses supérieures aux limites sélectionnées est représentée en bleu. Ces cartes doivent être interprétées avec prudence en raison des incertitudes qui sont expliquées plus en détail dans la section 7. En raison des effets confondants des aurores boréales, la région septentrionale a été exclue, comme l'explique la section 7.1.2

La figure 5.7 montre la surface terrestre des 38 pays de l'EEE dont les émissions lumineuses sont inférieures au seuil de 2 nW/cm²/sr au-delà duquel on peut s'attendre à un impact négatif sur les écosystèmes et leur faune, au moins dans une faible mesure. Les régions colorées en noir peuvent être habitées par des espèces sauvages avec seulement une perturbation minimale en termes d'exposition à la lumière artificielle. Si l'on compare les zones où les émissions lumineuses sont inférieures à 2 nW/cm²/sr entre 2014/15 et 2020/21, on constate une diminution de 91 % à 90 %. Même si cela ne semble pas être un grand changement en termes de pourcentage, cette réduction de la surface terrestre étiquetée comme "écologiquement sûre" a entraîné une diminution de la connectivité de l'habitat. Les points lumineux dispersés peuvent perturber de vastes étendues de terre contiguës qui étaient auparavant épargnées par les installations d'éclairage anthropiques et qui sont donc très précieuses pour la préservation de la biodiversité mondiale.

Figure 5.8 : Signal 1 de la pollution lumineuse écologique. Les cartes illustrent les zones "écologiquement sûres" affectées par des émissions lumineuses < 2 nW/cm²/sr (2014/15 vs. 2020/21).



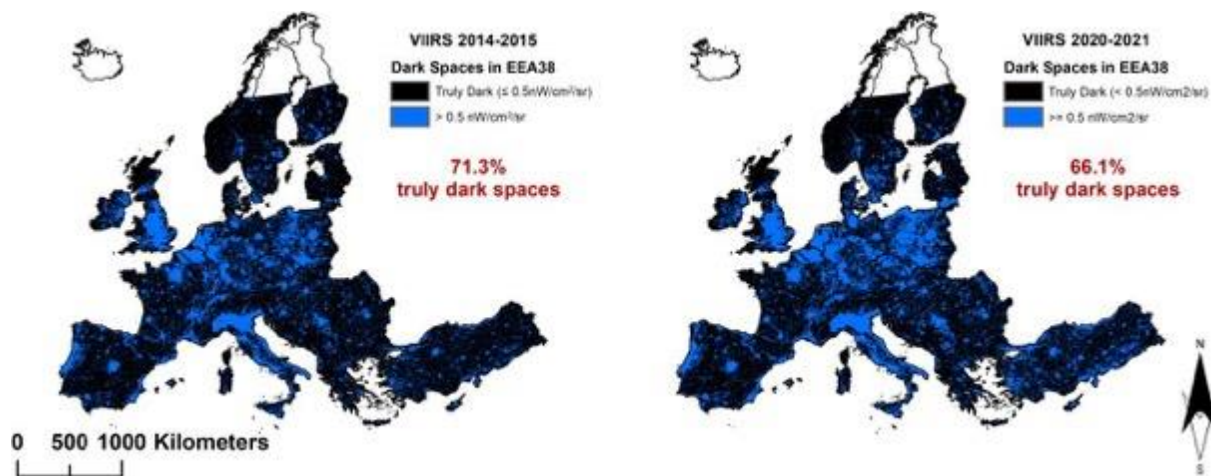
Note : La surface terrestre européenne avec des émissions lumineuses < 2 nW/cm² /sr est représentée en noir et les zones avec des émissions plus élevées en bleu - une comparaison entre les deux périodes 2014/15 et 2020/21. Exclusion de la région du Nord représentée en blanc en raison de l'effet confusionnel des aurores boréales. Proportion d'espaces "vraiment sombres" en rouge.

Source : Swiss TPH.

La figure 5.8 montre la surface terrestre sur le territoire de l'EEE en dessous de laquelle les espèces sauvages et les humains peuvent connaître des conditions relativement naturelles (< 0,5 nW/cm² /sr)

non affectées par l'éclairage artificiel. La surface terrestre moyenne identifiée comme espaces "vraiment sombres" dans les 38 pays de l'EEE s'élevait à 71,3 % en 2014/15, mais a baissé à 66,1 % au cours des huit dernières années. Cela correspond à une diminution totale de 5,2 %, ce qui suggère qu'une région relativement vaste de l'Europe a légèrement augmenté sa luminosité, alors qu'il n'y avait pas beaucoup de zones où les niveaux d'émission ont augmenté dans des proportions importantes. L'impact de changements aussi minimes n'est toutefois pas bien établi, si ce n'est en termes de détérioration de la vision humaine du ciel nocturne.

Figure 5.9 : Signal2 de la pollution lumineuse écologique. Les cartes illustrent les espaces "vraiment sombres" affectés par des émissions lumineuses < 0,5 nW/cm² /sr (2014/15 vs. 2020/21).



Note : La surface terrestre européenne avec des émissions lumineuses < 0,5 nW/cm² /sr est représentée en noir et les zones avec des émissions plus élevées en bleu - une comparaison entre les deux périodes 2014/15 et 2020/21. L'exclusion de la région du Nord représentée en blanc est due à l'effet de confusion des aurores boréales. Proportion d'espaces "vraiment sombres" en rouge.

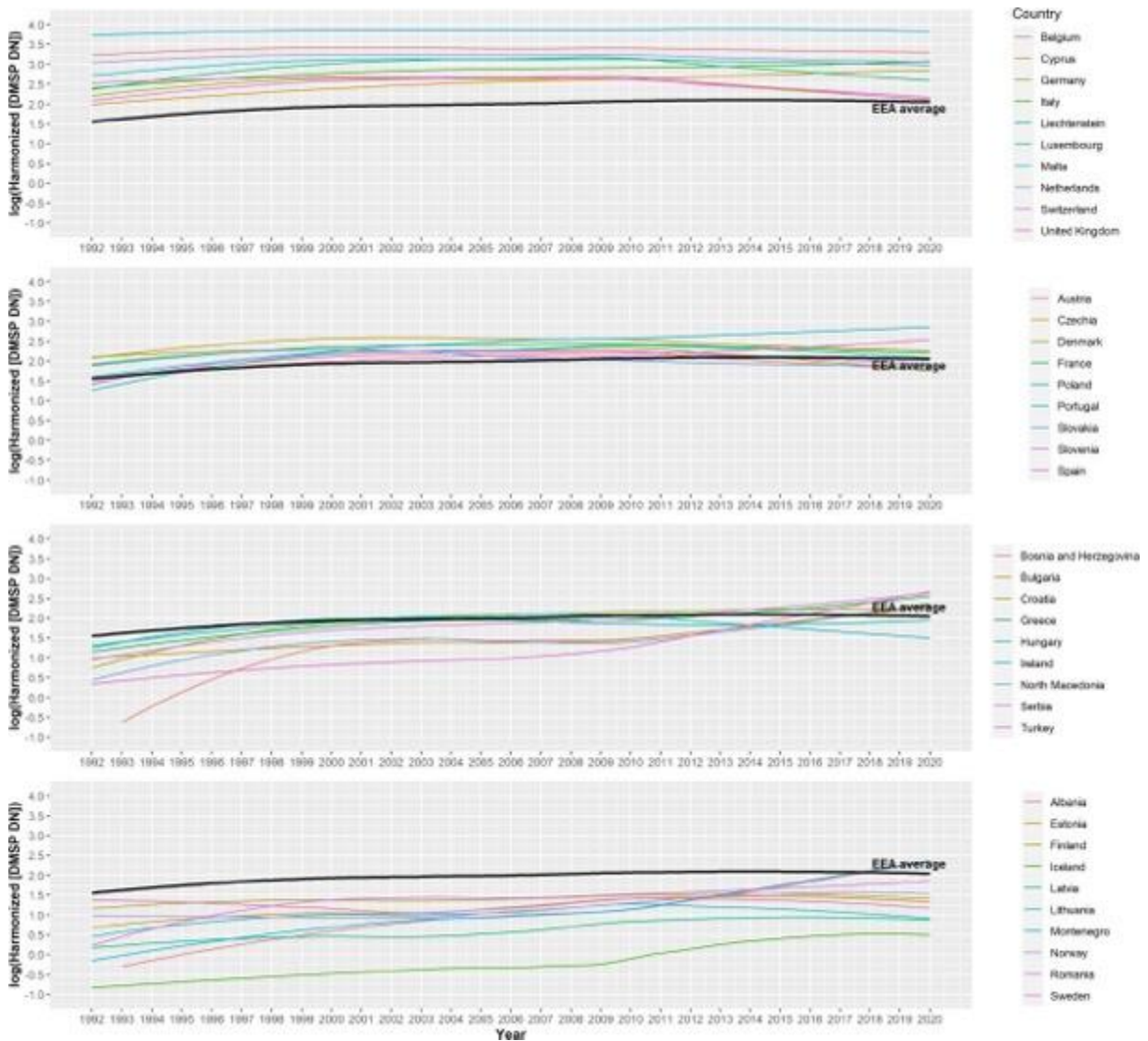
5.4 Tendances historiques

Comme indiqué précédemment, deux sources de données sont disponibles pour synchroniser les mesures des émissions de lumière nocturne provenant des deux sources de données de télédétection, à savoir DMSP et VIIRS. Le "jeu de données harmonisé" (Li et al., 2020) aligne les données VIIRS sur les unités DMSP et couvre toutes les années entre 1992 et 2020. Le "extended time-series data" (Chen et al., 2021) couvre la période 2000 - 2020 et fournit des données en unités VIIRS.

La figure 5.9 montre l'évolution des émissions lumineuses moyennes dans les 38 pays de l'EEE depuis les années 1990, à l'aide des données harmonisées du DMSP. Les données sont disponibles à une résolution spatiale de 1 x 1 km² et sont mesurées en "nombres numériques" (DN) allant de 0 à 63. Pour une meilleure comparaison entre les pays, les tendances sont présentées sur une échelle logarithmique. Une fois de plus, on observe de grandes différences entre les rendements lumineux des pays. Les pays situés dans la moitié inférieure du classement des émissions lumineuses ont connu une augmentation plus forte de la luminosité que les pays à forte émission. Dans l'ensemble, cet ensemble de données est plus cohérent avec les données historiques du DMSP, alors que les résultats dérivés de VIIRS sont plus fluctuants au cours de la période à partir de 2015, en particulier pour les pixels avec des valeurs DN inférieures à 10. L'incertitude est donc plus grande, en particulier dans les régions où les niveaux de luminance sont faibles.

Source : Swiss TPH.

Figure 5.10 : Tendances des émissions lumineuses moyennes annuelles entre 1992 et 2020 pour chaque pays de l'EEE38 sur la base d'un ensemble de données historiques harmonisées

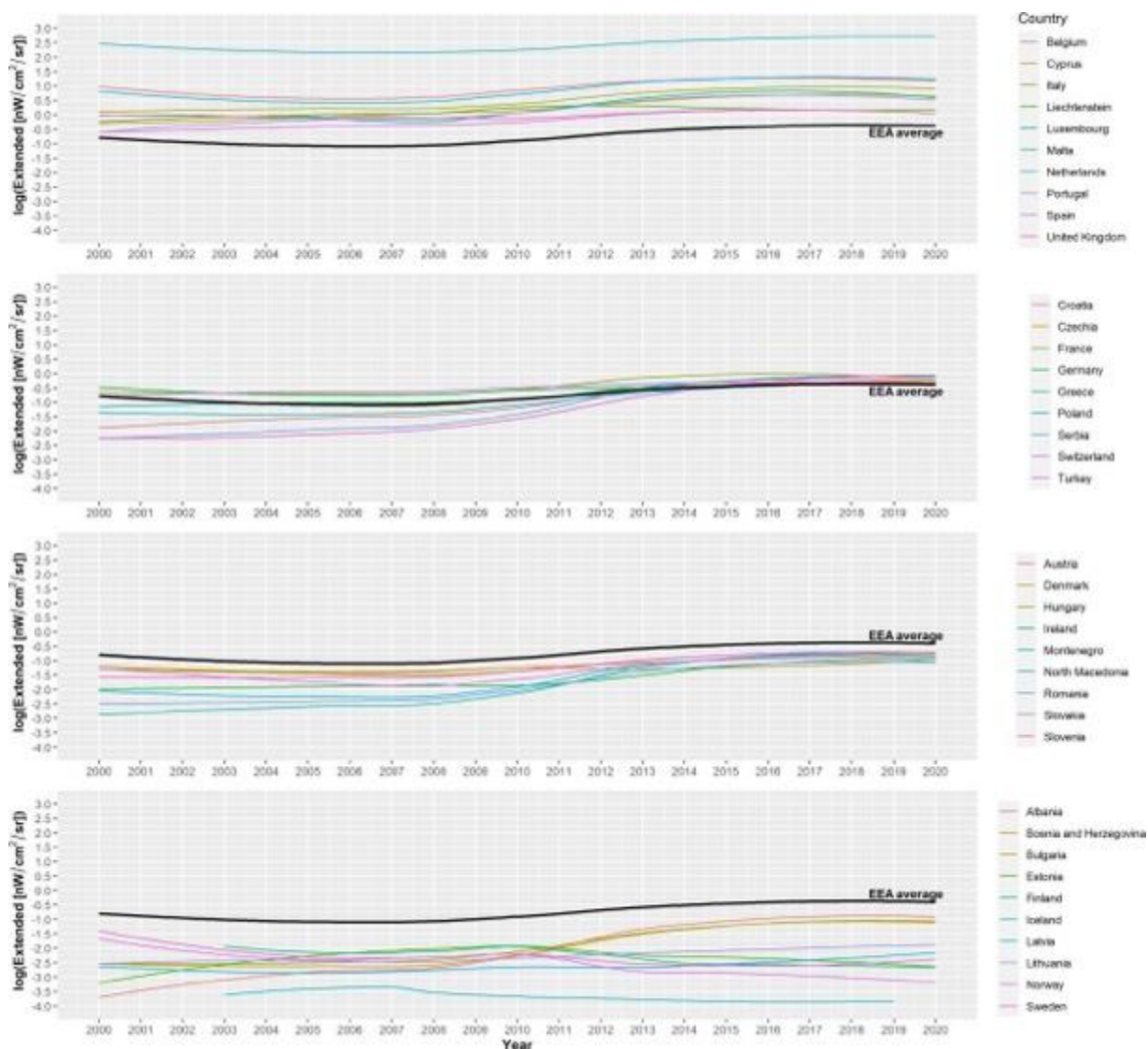


Note : Les émissions lumineuses moyennes annuelles (sur une échelle logarithmique) au cours de la période 1992-2020 ont été calculées pour chaque pays de l'EEE38 à partir des données de l'"ensemble de données harmonisées" à une résolution spatiale de 1 km²). Une fonction de lissage par régression polynomiale locale (loess) a été ajustée aux données d'émissions moyennes annuelles (transformées en logarithme) afin de comparer graphiquement les tendances temporelles. Les pays ayant les émissions lumineuses les plus élevées (quantile supérieur de 25 %) sont représentés dans le panneau supérieur, les pays ayant les deuxièmes émissions lumineuses les plus élevées (quantile de 50 % - 75 %) dans le deuxième panneau, les pays ayant les deuxièmes émissions lumineuses les plus faibles (quantile de 25 % - 50 %) dans le troisième panneau et les pays ayant les émissions lumineuses moyennes les plus faibles (quantile inférieur de 25 %) ont été regroupés dans le panneau inférieur. La moyenne des émissions lumineuses de l'ensemble de la zone EEE38 est indiquée par une courbe noire en gras dans les quatre panneaux, à titre de référence.

Source : Swiss TPH.

La figure 5.10 représente les moyennes annuelles des émissions lumineuses sur chaque pays de l'EEE38 entre 2000 et 2020, sur la base des "données de séries temporelles étendues" disponibles à une résolution spatiale de 500 x 500 m². Les unités de mesure sont les mêmes que dans VIIRS (c'est-à-dire nW/cm² /sr). Les unités de mesure sont les mêmes que dans VIIRS (c'est-à-dire nW/cm² /sr) et une fois de plus, une transformation logarithmique a été appliquée aux données pour une image plus compréhensible. La principale différence avec les tendances basées sur les données harmonisées de la figure 9 est l'augmentation rapide des émissions lumineuses moyennes autour de 2010. L'une des limites de ces données est que pour les années 2000, 2001 et 2002, des valeurs manquent pour certains pays d'Europe du Nord.

Figure 5.11 : Tendances des émissions lumineuses moyennes annuelles entre 2000 et 2020 pour chaque pays de l'EEE38 sur la base des séries chronologiques historiques étendues



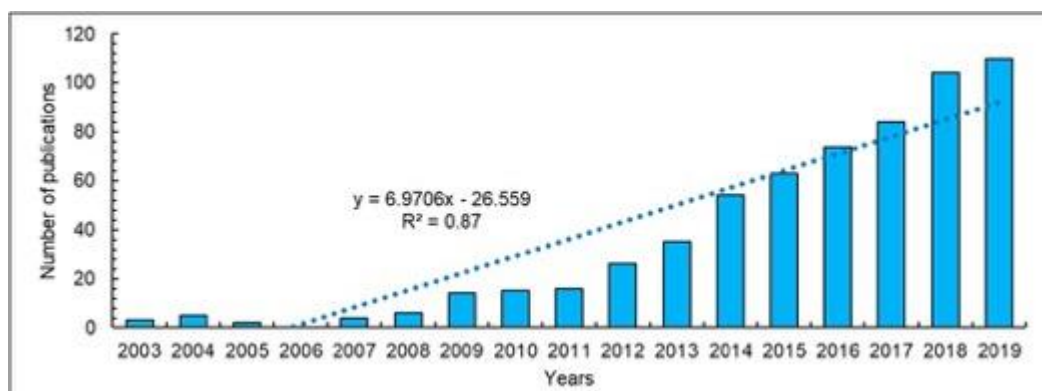
Note : Les émissions lumineuses moyennes annuelles (sur une échelle logarithmique) au cours de la période 2000-2020 ont été calculées pour chaque pays de l'EEE38 à partir des "données de séries temporelles étendues" à une résolution spatiale de 500 m². Une fonction de lissage par régression polynomiale locale (loess) a été ajustée aux données d'émissions moyennes annuelles (transformées en logarithme) afin de comparer graphiquement les tendances temporelles. Les pays ayant les émissions lumineuses les plus élevées (quantile supérieur de 25 %) sont représentés dans le panneau supérieur, les pays ayant les deuxièmes émissions lumineuses les plus élevées (quantile de 50 % - 75 %) dans le deuxième panneau, les pays ayant les deuxièmes émissions lumineuses les plus faibles (quantile de 25 % - 50 %) dans le troisième panneau et les pays ayant les émissions lumineuses moyennes les plus faibles (quantile inférieur de 25 %) ont été regroupés dans le panneau inférieur. La moyenne des émissions lumineuses de l'ensemble de la zone EEE38 est indiquée par une courbe noire en gras dans les quatre panneaux, à titre de référence.

Source : Swiss TPH.

6 Recherche actuelle en Europe

Parallèlement à l'augmentation globale de la pollution lumineuse, le corpus scientifique consacré aux impacts interdisciplinaires de l'éclairage artificiel s'est étoffé. Une recherche documentaire entre 2003 et 2019 sur le terme "Light Pollution" a montré une augmentation linéaire des publications scientifiques (figure 6.1). Au total, 57 pays travaillent actuellement sur des sujets liés à la pollution lumineuse, les États-Unis étant les premiers à produire le plus grand nombre de publications. De nombreux efforts de recherche proviennent également d'Allemagne, d'Australie, d'Espagne, des Pays-Bas, du Royaume-Uni et de Chine (Rodrigo-Comino et al., 2021).

Figure 6.1 : Augmentation linéaire de la recherche sur la pollution lumineuse



Note : Nombre de publications scientifiques et tendance récente sur la pollution lumineuse sur la base de l'ISI Web of Science de 2003 à 2019.

Source : Rodrigo-Comino et al, 2021.

En conséquence, de nouvelles méthodes d'étude de la dynamique des écosystèmes ont été appliquées, l'analyse et la précision des données de télédétection ont été améliorées et la sensibilisation du public s'est accrue grâce à l'invention d'approches éducatives progressives. Dans la section suivante, nous donnons un aperçu des recherches actuellement menées dans différents États membres de l'UE pour lutter contre cette menace environnementale. Quelques exemples de projets en cours et d'études récemment publiées utilisant des méthodes innovantes en Europe ont été sélectionnés à cette fin. Dans la section suivante, nous donnons un aperçu des recherches actuellement menées dans les différents États membres de l'UE pour lutter contre cette menace environnementale. Quelques exemples de projets en cours et d'études récemment publiées utilisant des méthodes innovantes à travers l'Europe ont été sélectionnés à cette fin.

6.1 Recherche écologique

Diverses études ont mis en évidence les conséquences négatives que l'éclairage artificiel peut avoir au niveau des espèces ou même de groupes taxonomiques entiers, mais il est plus difficile d'estimer l'effet en cascade que de tels changements de population peuvent avoir sur l'ensemble de l'écosystème. Récemment, des écologistes ont cherché à quantifier le potentiel des sources lumineuses anthropiques à modifier la dynamique des écosystèmes en perturbant les interactions trophiques.

Allemagne

L'institut de limnologie de Constance a donc choisi de se concentrer sur une espèce d'arthropode connue pour son importance écologique cruciale dans les habitats aquatiques. La daphnie est une puce aquatique qui nettoie l'eau des particules d'algues et sert en même temps de source de nourriture pour une variété d'espèces, ce qui place cette espèce au centre du réseau alimentaire. Les populations de zooplancton telles que les daphnies effectuent une migration verticale diurne, un comportement dépendant de la lumière. Pendant la nuit, l'ensemble de la population migre vers les couches d'eau à la surface jusqu'à ce que la lumière du jour les fasse retourner vers les eaux profondes. D'une part, cela

créée une fenêtre spatiale et temporelle sans prédateurs pour le phytoplancton et, d'autre part, il s'agit d'un important transport de nutriments pour le niveau trophique suivant. Le gène responsable de l'horloge circadienne qui guide le comportement de la daphnie s'est révélée modifiée par la lumière artificielle nocturne, ce qui pourrait entraîner une modification de la croissance de la cyanobactérie (Cremer et al., 2022). L'Institut Leibniz d'écologie des eaux douces et des pêches intérieures (IGB) de Berlin a inventé une installation d'éclairage émettant une luminance diffuse pour imiter différents niveaux de lueur du ciel et tester expérimentalement l'impact de la lumière artificielle sur la dynamique de l'écosystème. Le système d'éclairage est innovant dans sa capacité à produire un champ lumineux homogène pour un étang d'eau douce entier et permet ainsi d'étudier différents scénarios de pollution lumineuse dans des conditions naturelles, en mettant l'accent sur les interactions entre le phytoplancton et le zooplancton. La recherche allemande visant à étudier les mécanismes sous-jacents de la pollution lumineuse écologique fait partie du projet Illuminating Lake Ecosystems (ILES), financé par l'Association Leibniz, et les expériences sont généralement réalisées dans le LakeLab (Jechow et al., 2021). D'autres recherches lancées par l'IGB visent à comprendre l'effet de la pollution lumineuse sur les communautés mondiales d'insectes. Alors que les projets NaturLicht et Ausse visent à établir un lien entre le type de source lumineuse et les espèces d'insectes attirées par celle-ci, les scientifiques des projets BELLVUE travaillent au développement de mesures qui intègrent des installations lumineuses innovantes protégeant la biodiversité des insectes (IGB, 2021).

Belgique

La Belgique est un autre pays qui étudie les effets écologiques en expérimentant des systèmes d'éclairage innovants imitant la pollution lumineuse. Le groupe d'écologie comportementale et d'écophysiologie de l'université d'Anvers a installé des lampes LED dans des nichoirs utilisés par les oiseaux chanteurs. Des travaux antérieurs ont établi un lien entre la lumière artificielle nocturne et la perturbation des schémas comportementaux, les changements physiologiques, la diminution de la condition physique et l'augmentation des niveaux d'hormones de stress. Les oisillons se sont révélés particulièrement vulnérables aux effets néfastes de la pollution lumineuse en raison de leur immobilité. La construction expérimentale a permis de tester des hypothèses sur des populations d'oiseaux sauvages qui ont été élaborées sur la base des résultats obtenus en laboratoire. Dans l'article le plus récent, des mésanges nidifiantes ont été exposées à de faibles niveaux de pollution lumineuse pendant une semaine, tandis que les caractéristiques des plumes, les concentrations d'hormones et le succès de l'envol ont été évalués. Bien que le traitement ait été limité à une période relativement courte, des conséquences telles que des changements dans la densité des plumes, des altérations métaboliques et une réduction de la taille du corps ont été observées. Il s'agit d'indicateurs typiques d'un stress physiologique qui peut entraîner un déclin durable de la condition physique. Cette expérience a été réalisée dans le cadre d'un projet de recherche FWO et financée par l'Université d'Anvers, le FWO Flandres, l'ANR, le CPER ECONAT et la Commission européenne (Grunst et al., 2020).

6.2 Recherche visant à améliorer les méthodes de mesure

Aujourd'hui, les données les plus concluantes utilisées pour modéliser la pollution lumineuse mondiale proviennent de l'imagerie satellitaire, à savoir les deux sources de télédétection DMSP/OLS et VIIRS. Bien que ces deux systèmes fournissent des informations temporelles et spatiales précieuses sur l'éclairage artificiel nocturne, le résultat dépend fortement de plusieurs facteurs techniques. Certaines recherches visent à améliorer l'analyse des données et la précision du processus de collecte des données. En raison des coûts élevés de la télédétection, des options alternatives pour mesurer la luminosité du ciel nocturne sont étudiées de la même manière et, pour la société astronomique, des méthodes pour mesurer avec précision la luminance au niveau du sol sont également importantes.

Espagne et Royaume-Uni

Le travail collaboratif espagnol et anglais visant à améliorer l'analyse des données de télédétection fait partie de trois projets différents : le projet EMISSI@N (Ecological Monitoring from International Space Station Images At Night), le projet Cities at Night et le projet ORISON (Observing from the Stratosphere). Le projet EMISSI@N a été lancé pour améliorer la cartographie des différentes sources de lumière artificielle et leur composition spectrale. L'objectif est de quantifier précisément les conséquences

biologiques pour les humains et les animaux en utilisant l'imagerie de la Station spatiale internationale (Projet EMISSI@N, 2022). Le projet Cities at Night utilise également des photographies prises par les astronautes de l'ISS. Les photographies nocturnes à haute résolution sont mises à la disposition du public dans le but de créer une carte concluante de notre planète la nuit en permettant aux citoyens de cataloguer, de calibrer et de géoréférencer les données collectées (Cities at Night, 2022). Dans le cadre du projet ORISON, un dispositif innovant capable de transporter des télescopes a été développé pour orbiter autour de la terre dans les basses couches de l'atmosphère. Cette nouvelle technologie est censée servir d'alternative aux systèmes de collecte de données de télédétection expansifs (ORISON, 2022). Le financement de cette recherche provient d'une subvention du NERC, du Fonds de Recherche du Québec - Nature et Technologies (FRQNT), de la Coopération européenne en science et technologie (COST), du Loss of the Night Network, de la subvention FPU du Ministerio de Ciencia y Tecnologia et de F. Sánchez de Miguel.

La dernière publication scientifique a fourni une ligne directrice sur la façon de minimiser les imprécisions lors de l'estimation des niveaux de pollution lumineuse avec les données de télédétection DMSP/OLS et SNPP/VIIRS. Une méthode pour calibrer, traiter et géoréférencer correctement les images nocturnes a été suggérée et l'application a été expliquée en utilisant des photographies de l'Espagne comme exemple (de Miguel et al., 2021).

Pologne

À la faculté de génie électrique de l'université de technologie de Bialystok, les recherches visent à accroître la précision de la mesure de la luminosité du ciel nocturne à l'aide de la photométrie. Étant donné que la luminance du ciel diffère selon la localité, il est nécessaire de disposer d'un facteur de conversion précis pour traduire les mesures astronomiques dans le système photométrique visuel afin de pouvoir comparer les résultats au sein de la communauté astronomique. La dernière publication scientifique polonaise sur la pollution lumineuse a permis de convertir les résultats entre les deux systèmes photométriques dans la gamme mésopique, au lieu de la gamme photopique ou scotopique traditionnellement utilisée (Fryc et al., 2021).

6.3 Recherche socio-économique

Dans les pays disposant d'un cadre politique pour atténuer ou réduire les effets négatifs de la pollution lumineuse, la communauté scientifique travaille à l'élaboration de concepts visant à rendre la protection de l'obscurité attrayante pour les citoyens. La recherche se concentre donc sur l'aspect socio-économique de la pollution lumineuse et vise à répondre à des questions telles que : Comment pouvons-nous éclairer les villes de manière efficace sur le plan énergétique tout en maintenant l'impact écologique à un niveau minimum ou comment pouvons-nous créer des incitations qui augmentent la valeur des conditions d'éclairage naturel pour la société ?

France

Le laboratoire interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB) à Toulouse a mis au point une stratégie économique visant à donner un prix à la pollution lumineuse en transformant l'obscurité en ressource. Il s'agit d'une approche qui, si elle est mise en œuvre avec succès, aboutira probablement à une intégration délibérée de la réduction des émissions lumineuses dans la planification urbaine. Des études de cas menées dans deux régions montagneuses ont montré que la valeur économique d'un ciel de bonne qualité et d'un paysage nocturne intact peut compenser les bénéfices monétaires qui auraient pu être réalisés grâce à d'autres activités industrielles. En reconnaissant simultanément le développement durable et la préservation de la biodiversité comme faisant partie de l'économie nationale, les régions rurales présentant de faibles niveaux de pollution lumineuse ont le potentiel de gagner en pertinence économique. Ce travail a été développé dans le cadre du programme français Investissements d'Avenir, financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR). L'objectif de cette initiative est de diversifier et de moderniser les économies en soutenant l'innovation dans des secteurs négligés (Lapostolle & Challéat, 2021). Une autre méthode proposée pour accroître les efforts de préservation des conditions de lumière naturelle et des environnements nocturnes est le concept de réseaux écologiques sombres. Le nombre d'espèces de différents taxons a diminué et la dynamique des communautés a changé en raison de la

perte et de la fragmentation des habitats. Les sources de lumière anthropogéniques ont été reconnues comme des facteurs clés de la perturbation de la connectivité des paysages, tant dans l'espace que dans le temps. Il a été démontré que la lumière artificielle nocturne peut isoler les individus d'une même espèce en créant des zones éclairées difficiles à traverser, agissant ainsi comme des barrières physiques, ou qu'elle peut perturber la synchronisation des comportements dans les groupes d'espèces qui dépendent des signaux lumineux. Pour éviter ces conséquences écologiques négatives, des réseaux écologiques obscurs ont été conçus pour protéger l'environnement nocturne dans le but d'accroître l'utilité écologique. L'accent est mis sur la préservation des zones centrales d'obscurité les plus précieuses, qui peuvent ensuite être entourées de zones tampons, de petites parcelles entre les points sombres et de corridors pour maximiser la connectivité de l'habitat. En combinant cette approche structurelle avec des efforts éducatifs visant à informer les citoyens sur les mouvements de la faune, l'utilisation du paysage et les conséquences négatives de la pollution lumineuse, la prise de conscience sociétale et politique devrait s'accroître. En cas d'incorporation de réseaux écologiques sombres, la protection de l'obscurité devrait se traduire directement par la préservation de la biodiversité dans les systèmes politiques, l'aménagement du territoire et les actions de conservation. Outre le programme des Investissements d'Avenir, le développement de ce concept s'inscrit dans le cadre du programme national de recherche sur les transports, les infrastructures, les territoires, les écosystèmes et les paysages (ITTECOP), créé par le ministère français de la Transition écologique (MTE) en collaboration avec l'Agence française de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe). L'objectif de cette recherche est d'intégrer la préservation des trames écologiques et des structures paysagères dans la planification des projets d'infrastructures. Les réseaux écologiques sombres ont été inventés dans le cadre du projet CHIROLUM dédié à la réduction des impacts écologiques de la lumière artificielle nocturne le long des infrastructures publiques. Le Conseil Régional Nord-Pas-de-Calais et la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité, qui gèrent le projet TRAME NOIRE avec pour mission de protéger la biodiversité française, sont également impliqués (Challéat et al., 2021)

Espagne

À l'université de Grenade, des chercheurs du département de génie civil s'inquiètent de l'effet que la transition vers des diodes électroluminescentes (DEL) à haut rendement énergétique pourrait avoir sur les niveaux de pollution lumineuse. Ces travaux sont motivés par la crainte que le faible coût des nouvelles installations lumineuses ne conduise à des pratiques d'éclairage inconsidérées et par le fait que les longueurs d'onde blanches et bleues se sont révélées plus nocives pour la faune et la flore que les sources lumineuses conventionnelles. L'article publié le plus récent compare les systèmes LED blancs et jaunes. Différents scénarios d'éclairage ont été simulés dans des régions rurales dans le but de minimiser la pollution lumineuse sans compromettre la performance de l'éclairage. Les outils politiques adaptés aux lampes LED modernes comprennent principalement des réglementations limitant la composante bleue de la lumière ou la diffusion de Rayleigh. Cependant, il semble qu'il manque une base législative au-delà des conseils techniques, y compris des suggestions de conception qui abordent les questions de sécurité et garantissent simultanément la réalisation des objectifs de développement durable. Plusieurs suggestions visant à maintenir les performances visuelles à de faibles niveaux de luminance et à éviter les intrusions lumineuses pour réduire les implications écologiques ont été formulées (Peña-García & Sędziwy, 2020). Des économistes de la faculté de commerce et de gestion, également de l'université de Grenade, étudient les innovations en matière de conception avec une pollution lumineuse minimale pour diminuer les pertes monétaires et augmenter l'efficacité énergétique. Au lieu d'adopter un point de vue écologique, ils promeuvent le concept d'économie circulaire et étudient comment l'utilisation durable de l'énergie peut être améliorée dans les communautés rurales. Ils ont ainsi inventé une usine de biomasse locale capable d'alimenter le système d'éclairage public en électricité (Molina-Moreno et al., 2018).

Slovaquie

Un groupe de recherche de la faculté des sciences naturelles de l'université Matej Bel de *Banská Bystrica* a procédé à une évaluation des sites afin de trouver les meilleurs emplacements pour l'astrotourisme. Cela prouve la valeur économique d'un ciel nocturne clair et montre que l'importance de la préservation d'une qualité de ciel élevée est reconnue. Dans le cadre de l'étude, la luminosité du ciel nocturne a été enregistrée à l'aide d'appareils de mesure de la qualité du ciel (SQM) et les sites étudiés ont été classés en fonction de leur potentiel de développement de l'astrotourisme. Étant donné que les décideurs

politiques prévoient de conserver ces sites précieux pour les astronomes, il s'agit d'une autre façon d'intégrer la réduction de la pollution lumineuse sur le plan socio-économique (Kanianska et al., 2020).

7 Questions émergentes

7.1 Problèmes techniques liés à l'imagerie satellitaire

La façon dont les émissions lumineuses apparaissent sur une image satellite dépend fortement de différents facteurs tels que le type de source lumineuse émettrice, l'heure de la prise de vue, les conditions météorologiques ou la source de données de collecte.

7.1.1 Les caractéristiques de la lumière émise

En fonction du système d'éclairage utilisé, la palette de couleurs et l'intensité lumineuse apparaissant sur une image satellite peuvent varier. Chaque source lumineuse émet un ensemble caractéristique de longueurs d'onde qui se distingue par sa composition spectrale. Les lampadaires traditionnels au sodium, principalement installés à l'époque industrielle, émettent des longueurs d'onde dans une plage étroite autour de 598,3 nm, que l'œil humain perçoit comme de l'orange ou du jaune. Les technologies d'éclairage plus récentes, telles que les lampes à LED, peuvent émettre de la lumière dans une large bande de longueurs d'onde différentes autour de 400 et 700 nm, du blanc à l'ultraviolet, et sont perçues comme des sources lumineuses beaucoup plus brillantes. Capturée par un satellite, la lumière émise par les lampes au mercure et aux halogénures métalliques ou par les sources lumineuses fluorescentes et LED apparaît en blanc, tandis que les lampes au sodium à haute ou basse pression apparaissent en orange. Le remplacement par des technologies d'éclairage à faible consommation d'énergie est plus lent dans la partie orientale de Berlin que dans la partie occidentale, ce qui reflète l'histoire divisée de ces quartiers. Alors que la lumière émise à l'ouest apparaît en blanc, la zone orientale est encore en orange (Kyba et al., 2014).

L'imagerie satellitaire peut également aider à identifier la direction de la lumière émise par une installation lumineuse particulière. Alors que les systèmes d'éclairage architecturaux éclairent souvent directement vers le haut plutôt que d'illuminer le bâtiment lui-même, les lampadaires ou les enseignes lumineuses sont souvent protégés et apparaissent moins lumineux depuis l'espace. L'image 7.1 montre une image de Berlin prise depuis l'ISS. De nettes différences de couleur des sources lumineuses émettrices peuvent être détectées entre l'Est et l'Ouest. Les points lumineux dans le centre urbain représentent des systèmes d'éclairage architecturaux avec une lumière directe vers le haut. Ces sources lumineuses seraient détectées comme blanches mais peuvent apparaître bleues sur la photographie, ce qui est probablement dû à la balance des couleurs de la photographie (Kyba et al., 2014).

Image 7.1 : Image satellite de Berlin montrant différentes sources de lumière

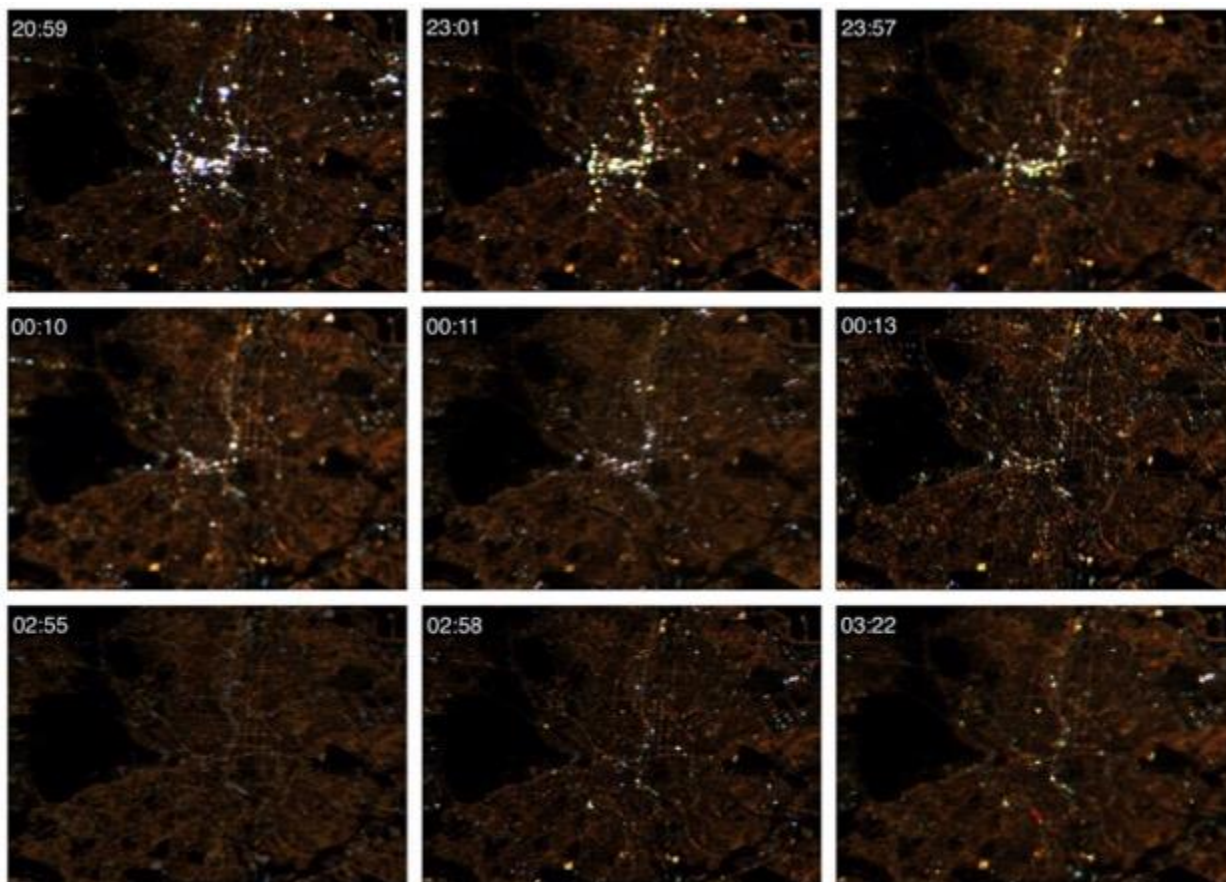


Note : Partie recadrée d'une autre image de Berlin prise depuis l'ISS (iss035e17210). L'aéroport de Tegel est identifié par

"TXL". Image reproduite avec l'aimable autorisation de l'unité des sciences de la terre et de la télédétection du Centre spatial Johnson de la NASA. Source : Kyba et al : Reproduit de Kyba et al. 2014.

Alors que certaines sources lumineuses telles que les aéroports, les gares ou les ports sont presque constamment allumées, la plupart des systèmes d'éclairage ne sont allumés que pendant une période limitée au cours de la nuit. L'image 7.2 montre les émissions lumineuses totales provenant de Madrid à différents moments. Au fur et à mesure que la nuit avance, l'utilisation de sources lumineuses individuelles diminue constamment, ce qui entraîne une baisse de la luminosité totale du ciel nocturne. Cela illustre le fait que la quantification de la pollution lumineuse dépend fortement de l'heure de l'analyse de télédétection (Kyba et al., 2014).

Image 7.2 : Images satellite de Madrid à différents moments de la nuit



Note : Neuf photographies de Madrid à différentes heures de la nuit. Les images sont disposées de manière à montrer des heures de plus en plus tardives, d'en haut à gauche à en bas à droite. Images reproduites avec l'aimable autorisation de l'unité des sciences de la terre et de la télédétection du Centre spatial Johnson de la NASA.

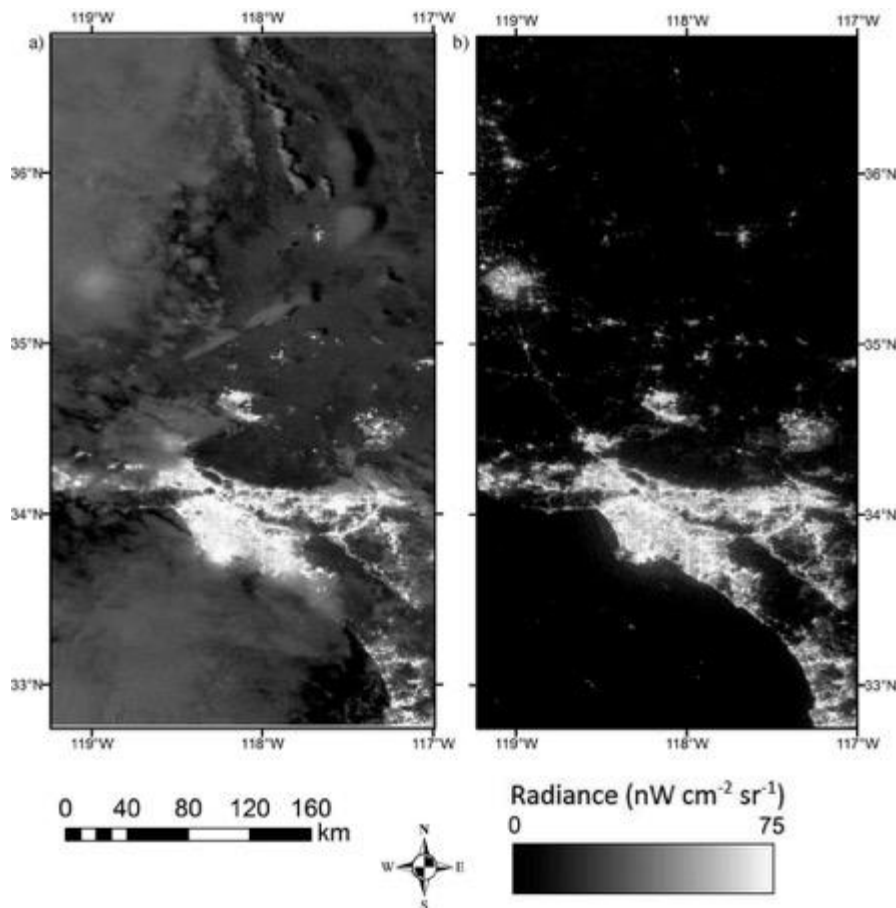
Source : Reproduit de Kyba et al. 2014.

7.1.2 L'influence des conditions météorologiques, de la luminosité de la lune et des aurores boréales

Les données satellitaires dépendent également fortement des conditions météorologiques. On a constaté que le ciel était éclairci par un facteur de 2,8 à 10,1 en raison de la couverture nuageuse, en fonction de l'urbanité de la zone (Kyba et al., 2011). De la même manière, la couverture neigeuse a le potentiel d'augmenter de manière significative la luminance du ciel en réfléchissant tout type d'éclairage. L'effet est encore plus prononcé dans les zones où le ciel est très lumineux (Aubé, 2015). Un autre facteur naturel susceptible d'augmenter les niveaux de pollution lumineuse est l'élévation de la lune. Sa luminosité naturelle a la capacité d'éclairer la surface de la terre à un point tel que les nuages et les caractéristiques structurelles du paysage peuvent être détectés sur une image satellite. Inversement, lors d'une nuit sans lune, les conditions météorologiques sont moins susceptibles de fausser les mesures d'émissions lumineuses artificielles. Dans l'image 7.3, une image satellite de la côte ouest américaine prise lors d'une

pleine lune est comparée à une photo prise lors d'une nuit de nouvelle lune. Alors que de faibles contours du paysage ne sont visibles qu'après un examen approfondi dans l'obscurité, la côte est clairement visible et les nuages reflètent fortement la luminosité de la pleine lune sur l'image de gauche (Elvidge et al., 2017).

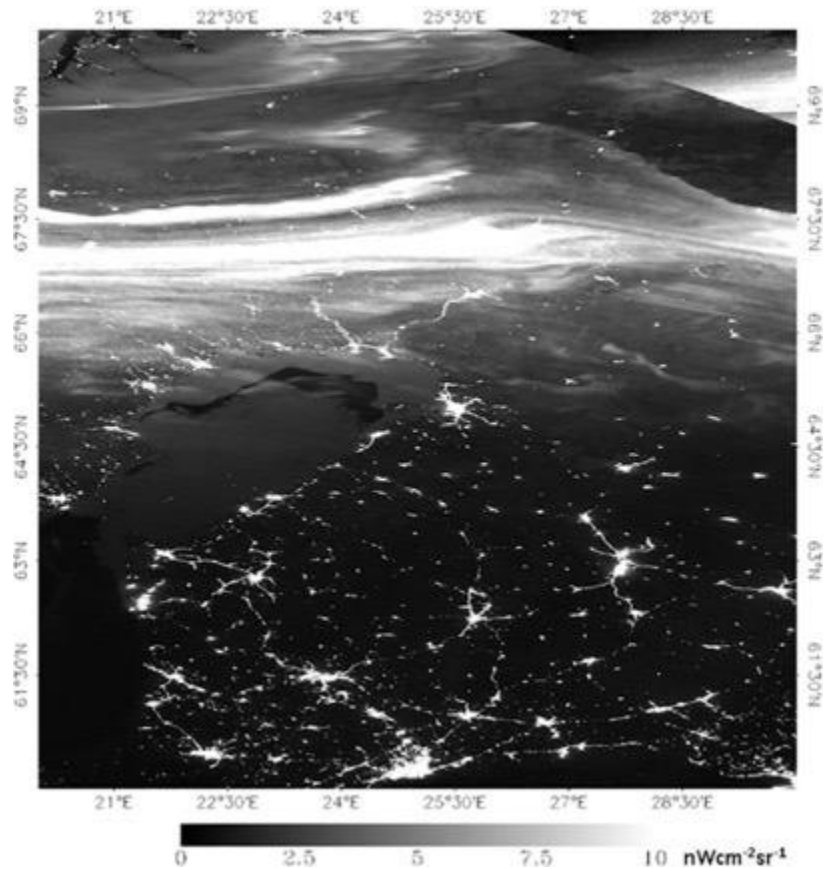
Image 7.3 : Imagerie satellitaire dans différentes conditions de luminosité de la lune



Note : Image de la pleine lune par rapport à la nouvelle lune de la région de Los Angeles capturée par le VIIRS. Source : Reproduit de Elvidge et al, 2017.

En outre, les données sur les émissions lumineuses nocturnes recueillies par le satellite VIIRS peuvent être influencées par la radiance des aurores reflétée par la surface de la Terre. VIIRS est capable de détecter des niveaux extrêmement faibles d'émissions lumineuses dans la gamme des longueurs d'onde visibles de 500 à 900 nm. Comme les lumières des aurores contiennent des lignes d'émission de l'oxygène atomique avec une largeur de bande de 557 à 630 nm et des lignes d'émission de l'azote moléculaire dans les 600 et 700 nm, ce signal lumineux est également capturé (Seaman & Miller, 2013 ; Wang et al., 2021). Image 7.4 a été prise lors d'une nuit sans lune, montrant les lumières réfléchies des aurores aux latitudes supérieures de l'Europe.

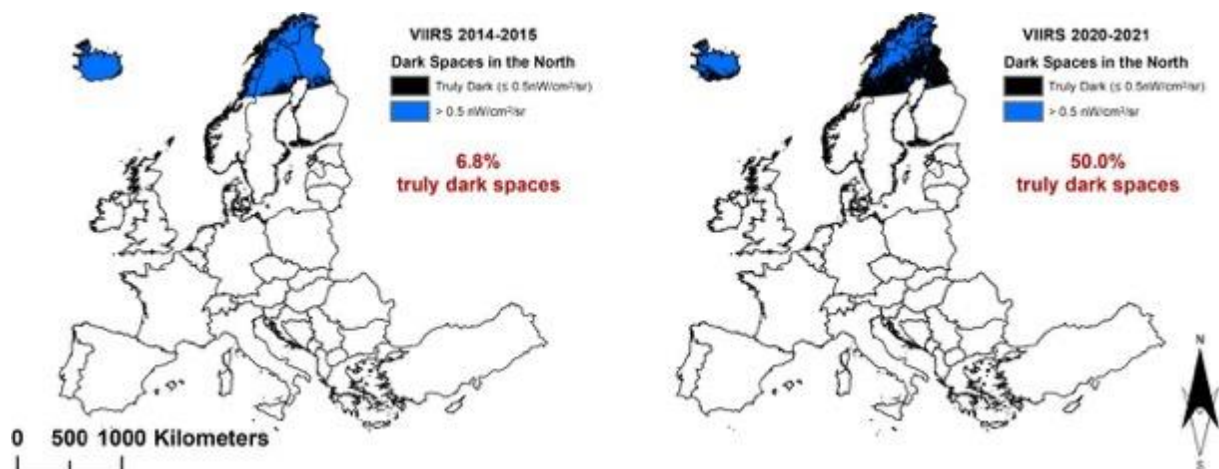
Image 7.4 : Imagerie satellite capturant l'événement Aurora



Note : Aurore en Europe du Nord capturée par le satellite VIIRS en 2018. Source : Wang et al : Reproduit de Wang et al, 2021.

Lors de l'analyse des données VIIRS pour produire les figures de la section 5, ce phénomène s'est avéré être un facteur de confusion dans les régions présentant des niveaux d'émissions lumineuses extrêmement faibles, dans la gamme inférieure à $1 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$. À titre d'exemple, la figure 7.1 montre les émissions lumineuses inférieures à $0,5 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ en noir et les zones présentant des niveaux d'éclairage plus élevés en bleu pour les deux périodes 2014/15 et 2020/21 en Europe du Nord. L'augmentation des parties noires sur la carte donne l'impression d'une tendance à la baisse de la pollution lumineuse. Toutefois, les niveaux d'émissions lumineuses plus élevés en 2014/15 peuvent être attribués à un phénomène naturel.

Figure 7.1 : Augmentation des zones dont les émissions lumineuses sont inférieures à 0,5 nW/cm²/sr en Europe du Nord en raison des aurores boréales

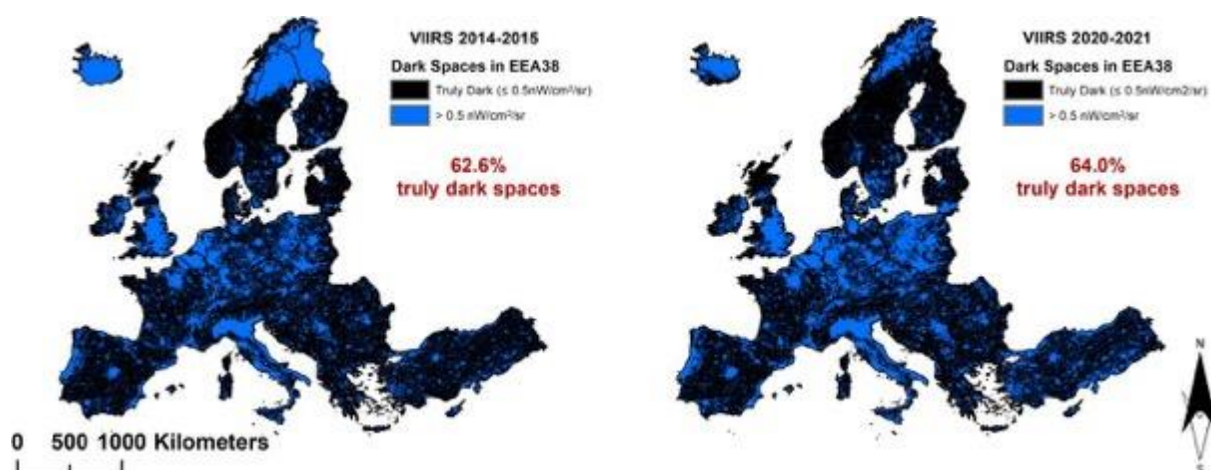


Note : La surface terrestre en Europe du Nord avec des émissions lumineuses < 0,5 nW/cm²/sr est représentée en noir et les zones avec des émissions plus élevées en bleu. La proportion d'espaces "vraiment sombres" est indiquée en rouge.

Source : Swiss TPH : Swiss TPH.

Au contraire, l'augmentation des émissions lumineuses enregistrée dans le reste de l'Europe montre la tendance réelle à l'augmentation des zones touchées par l'éclairage artificiel (comme indiqué dans la section 5). Mais en analysant les pixels couvrant les 38 pays de l'EEE, la zone avec un signal lumineux < 0,5 nW/cm²/sr capturé par le satellite VIIRS semble avoir augmenté de 1,4 %, ce qui donne une fausse impression de diminution des niveaux de pollution lumineuse due aux aurores boréales dans le Nord.

Figure 7.2 : Diminution moyenne des zones où les émissions lumineuses sont inférieures à 0,5 nW/cm² /sr dans l'ensemble des pays de l'EEE38, avec une tendance à la confusion.



Note : La surface terrestre des pays de l'EEE38 avec des émissions lumineuses < 2 nW/cm²/sr est représentée en noir et les zones avec des émissions plus élevées en bleu. La proportion d'espaces "vraiment sombres" est indiquée en rouge.

Source : Swiss TPH : Swiss TPH.

7.1.3 Limites de la source de données collectées

La quantification de la pollution lumineuse peut varier en fonction du système d'imagerie satellitaire qui collecte les données. Par exemple, le système VIIRS se caractérise par sa sensibilité à l'infrarouge proche, mais par sa relative insensibilité à la lumière bleue. Alors que les zones situées à proximité de puits de pétrole ou de volcans sont estimées plus lumineuses que ce que l'œil humain perçoit, la source satellitaire est pratiquement aveugle aux systèmes d'éclairage LED, de plus en plus populaires, qui représentent une grande partie des émissions lumineuses totales. En particulier, les installations d'éclairage émettant des lumières dont la longueur d'onde est inférieure à 500 nm peuvent ne pas être perçues. La lumière bleue se disperse davantage que la lumière rouge ou jaune, ce qui rend plus difficile la capture de ces émissions lumineuses par le satellite. Comme VIIRS mesure une large gamme de longueurs d'onde, mais que tous les détecteurs thermiques du capteur ne fonctionnent pas à leur puissance maximale, les valeurs mesurées de la lumière à des longueurs d'onde inférieures sont moins précises (Pérez Díaz et al., 2021). Cela peut se traduire par des affichages optimistes d'une réduction globale de la pollution lumineuse, créant ainsi une fausse impression (Kyba et al., 2017 ; Lyytimäki, 2020). Par comparaison, les données DMSP/OLS peuvent surestimer les émissions lumineuses dans les établissements urbanisés en raison de la résolution relativement faible, également connue sous le nom d'effet d'efflorescence. Les lumières brillantes peuvent se disperser dans les mailles voisines, ce qui entraîne une sous-estimation de l'hétérogénéité spatiale et donc une augmentation de la pollution lumineuse globale estimée (Huang et al., 2014).

7.2 Interaction de la pollution lumineuse avec d'autres polluants

Il a été démontré que le niveau de pollution lumineuse dépend fortement du nombre de particules dans le ciel. Les aérosols et les gouttelettes d'eau dans la basse atmosphère provoquent une dispersion de la lumière artificielle émise vers le haut, ce qui entraîne une prolongation de l'éclairage et une augmentation de la pollution lumineuse. Cependant, l'interaction de la pollution lumineuse avec d'autres polluants est encore mal comprise et constitue donc une préoccupation croissante de la communauté scientifique. Dans ce contexte, un modèle quantitatif pour le ciel urbain a été développé à l'Académie slovaque des sciences de Bratislava. Les aérosols diffèrent par leur composition chimique et leur distribution de densité, ce qui a un effet variable sur la diffusion de la lumière émise vers le haut par les sources lumineuses anthropogéniques. Les cônes de lumière qui persistent au-dessus des centres urbains ont été analysés à l'aide de données de télédétection. La distribution détectée de la lumière diffuse a donné des indications sur les propriétés des aérosols, qui étaient suffisamment détaillées pour permettre une quantification des niveaux de pollution de l'air. Sur la base de ces résultats, une méthode pratique a été inventée pour enregistrer la distribution de la taille et de la composition des particules d'aérosols par le biais de l'imagerie satellitaire (Kocifaj & Barentine, 2021). Cela prouve que d'autres polluants peuvent amplifier les effets négatifs de la pollution lumineuse.

7.3 La pollution lumineuse liée aux mouvements de population

Il a été constaté que l'ampleur de la pollution lumineuse était étroitement liée à l'expansion urbaine et à l'activité humaine (Dunnnett, 2015 ; Lamphar, 2020). Les images prises la nuit par des techniques de télédétection sont souvent utilisées comme indicateur du statut socio-économique, du niveau d'urbanité et de la richesse économique. Cela implique toutefois que tout lien entre la pollution lumineuse et un autre facteur lié à la santé de l'homme ou de l'écosystème est susceptible d'être confondu (Nadybal et al., 2020).

7.4 Peu de preuves pour établir des seuils de pollution lumineuse

À ce jour, il existe des valeurs seuils généralement reconnues qui définiraient des intensités lumineuses acceptables en dessous desquelles les impacts négatifs sur la santé humaine ou les implications écologiques sont inexistantes ou du moins mineurs. Lors de l'analyse des zones écologiques sur la base des données nocturnes VIIRS, au moins un faible impact négatif sur les écosystèmes et la biodiversité a

été établi aux endroits où l'émission lumineuse est supérieure à 2 nW/cm²/sr (Hale et al., 2018). La question de savoir si cette limite est suffisamment basse pour que les zones soient considérées comme écologiquement sûres n'a pas encore fait l'objet de recherches suffisantes (Hale & Arlettaz, 2019). Diverses intensités lumineuses ont été testées dans le cadre d'expériences ou d'études examinant un lien entre les effets néfastes sur la santé et les ALAN, mais le seuil en dessous duquel la santé humaine n'est pas affectée est encore inconnu (Esaki et al., 2019 ; M. Kim et al., 2018 ; Patel, 2019 ; Viola et al., 2008). Étant donné que les valeurs devraient varier en fonction des caractéristiques individuelles et de la plage de sensibilité de chaque espèce, la définition de ces limites est difficile. Afin d'atténuer l'impact écologique de la pollution lumineuse, il convient de maintenir et de protéger les environnements sombres que les espèces sensibles à la lumière peuvent utiliser pour se retirer. En outre, les recherches futures devraient viser à soutenir les méthodes d'évaluation de l'impact environnemental et écologique de la lumière artificielle. Une meilleure compréhension de la composition spectrale, de la périodicité et de la distribution spatiale de la lumière anthropique, associée à une connaissance systématique des relations écologiques et de la manière dont elles sont influencées par une perturbation des cycles lumineux naturels, est nécessaire (Gaston et al., 2013). En général, les seuils de pollution lumineuse à partir desquels un impact sur la santé humaine est attendu sont plus élevés que la limite à partir de laquelle les implications écologiques commencent.

Liste des abréviations

Abréviation	Nom
ALAN	Artificial Light At Night / Lumière artificielle la nuit
arcsec ²	Seconde d'arc carré
cd	Candela
cm ²	Centimètre carré
DMSP	Defence Meteorological Satellite Program / Programme de satellites météorologiques du département de la Défense
DN	Digital Numbers
DNB	Day/Night Band / Bande jour/nuit
EEA	European Environmental Agency / Agence européenne pour l'environnement
EU	European Union / Union européenne
kcd	Kilocandela
klm	Kilolumen
IGB	Leibniz Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries / Institut Leibniz d'écologie des eaux douces et des pêches intérieures
ipRGCs	intrinsically photosensitive retinal ganglion cells / Cellules ganglionnaires rétiniennes intrinsèquement photosensibles
LAN	Light At Night / Lumière la nuit
LED	Diode électroluminescente
LP	Light Pollution / Pollution lumineuse
lx	Lux
m ²	Mètre carré
mcd	Millicandela
mag	Magnitude
magV	Magnitude emitted in the green V spectral band (v = visual) / Magnitude émise dans la bande spectrale verte V (v = visuelle)
magSQM	Magnitude measured with a sky quality meter / Magnitude mesurée à l'aide d'un instrument de mesure de la qualité du ciel
NELM	Naked-Eye Limiting Magnitude / Magnitude limite à l'œil nu
nL	Nano lamberts
NSB	Night Sky Brightness / Luminosité du ciel nocturne
nW	Nanowatt
OLS	Operational Linscan System / Système Linscan opérationnel
PSQI	Pittsburgh Sleep Quality Index / Indice de qualité du sommeil de Pittsburgh
SCN	Suprachiasmatic nucleus / Noyau suprachiasmatique
SQM	Sky Quality Meter / Mesure de la qualité du ciel
sr	Stéradian
UK	United Kingdom / Royaume-Uni
US, USA	United States of America / États-Unis d'Amérique
VNIR	Visible and Near-Infrared / Visible et proche infrarouge
VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
OMS	Organisation mondiale de la Santé

Références

- Aceituno, J., et al, 2011, *An All Sky Transmission Monitor : ASTMOM*, (<https://doi.org/10.1086/661918>) consulté le 2 novembre 2022.
- Alarcon, M. R., et al, 2021, *Natural Night Sky Brightness during Solar Minimum*, *The Astronomical Journal*, 162(1), 25, (<https://doi.org/10.3847/1538-3881/abfdaa>) consulté le 2 novembre 2022.
- Altermatt, F. et Ebert, D., 2016, *Réduction du comportement de vol vers la lumière des populations de papillons de nuit exposées à long terme à la pollution urbaine. urbaine lumière urbaine à long terme*, *Biologie Letters*, 12(4), 20160111. (<https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0111>) consulté le 2 novembre 2022.
- Amt für Umweltschutz, 2008, *Lichtmissionen in Liechtenstein*, Amt für Umweltschutz, Fürstentum Liechtenstein, RENAT AG, 1-30.
- Aubé, M., 2015, *Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment*, *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 370(1667), 20140117, (<https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0117>) consulté le 2 novembre 2022.
- AURA et AURA-O., 2015, *Certification of the Chile AURA observatory Site as an International Dark Sky Sancturay*, The Association of Universities for Research in Astronomy (AURA) and the AURA Observatory in Chile (AURA-O), A Proposal to the International Dark-Sky Association, 1-30.
- Normes Autriche, 2016, *Pollution lumineuse - Mesure et évaluation*, ÖNORM O 1052 1, 1-26.
- Normes autrichiennes, 2022, *Lichtmissionen - Messung und Beurteilung*, ÖNORM O 1052, 1-35.
- Bará, S., et al, 2021, *Keeping light pollution at bay : A red-lines, target values, top-down approach*, *Environmental Challenges*, 5, 100212, (<https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100212>) accessed 2 novembre 2022.
- Bará, S., et al, 2022, *Estimating linear radiance indicators from the zenith night-sky brightness : On the Posch ratio for natural and light-polluted skies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 512(2), 2125-2134, (<https://doi.org/10.1093/mnras/stac410>) consulté le 2 novembre 2022.
- Bauer, S. E., et al, 2013, *A case-referent study : Light at night and breast cancer risk in Georgia*, *International Journal of Health Geographics*, 12(1), 23, (<https://doi.org/10.1186/1476-072X-12-23>) consulté le 2 novembre 2022.
- Bedrosian, T. A., et al, 2016, *Endocrine Effects of Circadian Disruption*, *Annual Review of Physiology*, 78(1), 109-131, (<https://doi.org/10.1146/annurev-physiol.021115-105102>) consulté le 2 novembre 2022.
- Bennie, J., et al, 2016, *Ecological effects of artificial light at night on wild plants*, *Journal of Ecology*, 104(3), 611-620, (<https://doi.org/10.1111/1365-2745.12551>) consulté le 2 novembre 2022.
- Bennie, J., et al., 2015, *Global Trends in Exposure to Light Pollution in Natural Terrestrial Ecosystems*, *Remote Sensing*, 7(3), 2715-2730, (<https://doi.org/10.3390/rs70302715>) consulté le 2 novembre 2022.
- Bird, B. L., et al., 2004, *Effects of Coastal Lighting on Foraging Behavior of Beach Mice*, *Conservation Biology*, 18(5), 1435-1439, (<https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00349.x>) accessed 2 novembre 2022.
- Blake, D., et al., 1994, *Use of lamplit roads by foraging bats in southern England*, *Journal of Zoology*, 234(3), 453-462, (<https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1994.tb04859.x>) consulté le 2 novembre 2022.
- Bortle, J. E., 2001, *Introducing the Bortle Dark-Sky Scale*, *Sky & Telescope*.
- Buchanan, B. W., 1998, *Low-Illumination Prey Detection by Squirrel Treefrogs*. *Journal of Herpetology*, 32(2), 270, (<https://doi.org/10.2307/1565308>) consulté le 2 novembre 2022.

- Bullough, J., et al., 2008, *Predicting discomfort glare from outdoor lighting installations*, *Lighting Research & Technology*, 40(3), 225-242, (<https://doi.org/10.1177/1477153508094048>) accessed 2 novembre 2022.
- Campos SMC, 2017, 'The impact of artificial lighting on nature', In 6th SENAC MEETING of Integrated Knowledge Senac Sorocaba.
- Challéat, S., et al, 2021, *Grasping darkness : Le dark ecological network comme cadre socio-écologique pour limiter les impacts de la pollution lumineuse sur la biodiversité*, *Ecology and Society*, 26(1), art15, (<https://doi.org/10.5751/ES-12156-260115>) consulté le 2 novembre 2022.
- Chen, E., 2010, "Seeing Blue", *Nightscape*, 80, 8-12.
- Chen, Z., et al, 2021, *An extended time series (2000-2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration*, *Earth System Science Data*, 13(3), 889-906, (<https://doi.org/10.5194/essd-13-889-2021>) consulté le 2 novembre 2022.
- Chepesiuk, R., 2009, *Missing the Dark : Health Effects of Light Pollution*, *Environmental Health Perspectives*, 117(1), 8, (<https://doi.org/10.1289/ehp.117-a20>) consulté le 7 novembre 2022.
- CIESIN (Center for International Earth Science Information Network) - Columbia University, 2018, *Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4) : Population Density Adjusted to Match 2015 Revision UN WPP Country Totals*, Revision, 11, Palisades, New York : NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), (<https://doi.org/10.7927/H4F47M65>) consulté le 3 novembre 2022.
- Cho, J. R., et al, 2013, *Let there be no light : L'effet de la lumière de chevet sur la qualité du sommeil et les rythmes électroencéphalographiques de fond rythmes électroencéphalographiques*, *Sommeil Medicine*, 14(12), 1422-1425, (<https://doi.org/10.1016/j.sleep.2013.09.007>) consulté le 2 novembre 2022.
- Cinzano, P., 2005, "Night Sky Photometry with Sky Quality Meter", *ISTIL Internal Report*, 1-15.
- Cinzano, P., et al., 2000, *The artificial night sky brightness mapped from DMSP satellite Operational Linescan System measurements*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 318(3), 641-657, (<https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2000.03562.x>) consulté le 2 novembre 2022.
- Cissé, Y. M., et al, 2017, *Depressive-like behavior is elevated among offspring of parents exposed to dim light at night prior to mating*, *Psychoneuroendocrinology*, 83, 182-186. (<https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2017.06.004>) consulté le 2 novembre 2022.
- Les villes la nuit, 2022, *CITIZEN SCIENCE POUR CONSTRUIRE UNE CARTE EN COULEURS DE LA TERRE LA NUIT, POUR THE FIRST TIME*, Consulté le 04 mars 2022 sur (<https://citiesatnight.org>) consulté le 2 novembre 2022.
- Cleveland, W. S., et al, 1992, 'Local regression models', Chapter 8 of *Statistical Models in S* eds J.M. Chambers and T.J. Hastie, Wadsworth & Brooks/Cole.
- Cohen, J. H. et Forward Jr, R. B., 2009, 'Zooplankton Diel Vertical Migration-A Review Of Proximate Control,' (Migration verticale diurne du zooplancton - Examen du contrôle de proximité) *Oceanography et Marine Biology*, 47(5), 77-109, (<https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781420094220-5/zooplankton-diel-vertical-migration-review-proximate-control-jonathan-cohen-richard-forward-jr>) consulté 7 novembre 2022.
- Commonwealth d'Australie, 2020, *National Light Pollution : Guidelines for Wildlife*. Consulté le 21 janvier 2022 à partir de (www.environment.gov.au/system/files/resources/2eb379de-931b-4547-8bcc-f96c73065f54/files/national-light-pollution-guidelines-wildlife.pdf) consulté le 2 novembre 2022.
- Comunidad Autónoma de Cataluna, 2001, Ley 6/2001, de 31 de mayo, de Ordenación Ambiental del

- Alumbrado para la Protección del Medio Nocturno, 149/3407 (2001).
- Consiglio Regionale, 2000, Legge regionale 13 aprile 2000, n.23. Norme per la riduzione e per la prevenzione dell'inquinamento luminoso - Modificazioni all legge regionale 6 agosto 1999, n. 14. Lazio, Italie.
- Conseil de l'Union européenne, 2020, Proposition de DÉCISION DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL relative à un programme d'action de l'Union générale pour l'environnement à l'horizon 2030, COM(2020), 652 final, 2020/0300 (COD), Consulté le 31 octobre, 2022 à partir de <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-11987-2020-INIT/en/pdf> consulté le 2 novembre 2022.
- Cremer, R., et al, 2022, *More Light Please : Daphnia Benefit From Light Pollution by Increased Tolerance Toward Cyanobacterial Chymotrypsin Inhibitors*, *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10(834422), (<https://doi.org/10.3389/fevo.2022.834422>) consulté le 2 novembre 2022.
- Parlement croate, 2019, NN 14/2019 (7.2.2019), Zakon o zaštiti od svjetlosnog onečišćenja, NN 14/2019 - Loi sur la protection contre la pollution lumineuse.
- Dark Skies for All, 2022, (<https://darks skies4all.org>) consulté le 31 octobre 2022.
- Sombre Ciel Irlande, 2019, Notre vision et politique sur la réduction de la pollution lumineuse en Ireland", (<https://www.darks sky.ie/wp-content/uploads/2019/04/Dark-Sky-Ireland-Policy-Document-2019.pdf>) consulté le 31 octobre 2022.
- Davies, T. W., et al, 2014, *The nature, extent, and ecological implications of marine light pollution*, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(6), 347-355, (<https://doi.org/10.1890/130281>) consulté le 2 novembre 2022.
- de Miguel, A. S., et al, 2021, *Colour remote sensing of the impact of artificial light at night (II) : Calibration of DSLR-based images from the International Space Station*, *Remote Sensing of Environment*, 264, 112611, (<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112611>) consulté le 2 novembre 2022.
- Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2013, 'Artificial Light in the Environment-Policy Update', *Policy Team, The National Archives*, 1-14.
- Ministère de l'environnement, de l'alimentation et des affaires rurales, 2022, Environmental Protection Act 1990 (c. 43). Part I - Integrated Pollution Control and Air Pollution Control by Local Authorities, 1-445, (<https://www.legislation.gov.uk/ukpga/1990/43/data.pdf>) consulté le 31 octobre 2022.
- Deutscher Bundestag, 2019, Lichtverschmutzung - Rechtliche Regelungen zur Beschränkung von Beleuchtung in Deutschland und ausgewählten europäischen Staaten, WD 7-3000-009/19 1 (2019).
- Donatello, S., et al, 2019, *Révision des critères de l'UE pour les marchés publics écologiques pour l'éclairage public et les feux de circulation : Rapport technique et proposition de critères*. Commission européenne. Centre commun de recherche, (<https://data.europa.eu/doi/10.2760/372897>) consulté le 2 novembre 2022.
- Downs, N. C., et al., 2003, *The effects of illuminating the roost entrance on the emergence behaviour of Pipistrellus pygmaeus*, *Biological Conservation*, 111(2), 247-252, ([https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(02\)00298-7](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(02)00298-7)) consulté le 2 novembre 2022.
- Dunnett, O. 2015, *Contested landscapes : The moral geographies of light pollution in Britain*, *Cultural Geographies*, 22(4), 619-636, (<https://doi.org/10.1177/1474474014542746>) consulté le 3 novembre 2022.
- Eisenbeis, G. et Hänel, A., 2009, Chapitre 15. La pollution lumineuse et l'impact de l'éclairage artificiel nocturne sur les insectes. *A. H.*, 20.
- Elgert, C., et al, 2020, *Reproduction under light pollution : Maladaptive response to spatial variation in*

- artificial light in a glow-worm*, Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences, 287(1931), 20200806, (<https://doi.org/10.1098/rspb.2020.0806>) consulté le 3 novembre 2022.
- Elvidge, C. D. et al, 2013, *Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights*, Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network, 35(0), 62. (https://www.researchgate.net/publication/271020677_Why_VIIRS_data_are_superior_to_DMSP_for_mapping_nighttime_lights) consulté le 9 novembre 2022.
- Elvidge, C. D., et al, 2017, *VIIRS night-time lights*, International Journal of Remote Sensing, 38(21), 5860-5879, (<https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1342050>) consulté le 3 novembre 2020.
- Projet EMISSI@N 2022, KEVIN J GASTON - Professeur de biodiversité et de conservation à l'Université d'Exeter 2022. Consulté le 4 mars 2022 sur kevingaston.com/research-2/ecological-impacts-of-artificial-nighttime-light-ecolight/artificial-light-at-night/emissin-project/.
- Esaki, Y., et al, 2019, *Light exposure at night and sleep quality in bipolar disorder : The APPLE cohort study*, Journal of Affective Disorders, 257, 314-320. (<https://doi.org/10.1016/j.jad.2019.07.031>) consulté le 3 novembre 2022.
- Commission européenne, 2001, Mise en œuvre de la directive 2001/42 relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement. Consulté le 31 octobre 2022 à l'adresse (https://ec.europa.eu/environment/archives/eia/pdf/030923_sea_guidance.pdf), consulté le 3 octobre 2022 à l'adresse (https://ec.europa.eu/environment/archives/eia/pdf/030923_sea_guidance.pdf) novembre 2022.
- Commission européenne, 2005, Directive 2005/32/CE du Parlement européen et du Conseil du 6 juillet 2005 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits consommateurs d'énergie et modifiant la directive 92/42/CEE du Conseil et les directives 96/57/CE et 2000/55/CE, 32005L0032 29 (2005).
- Commission européenne, 2010, Directive 2010/75/UE du Parlement européen et du Conseil du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution) Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE, 32010L0075 159 (2010).
- Commission européenne, 2018, Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions. Initiative de l'UE en faveur des pollinisateurs. COM(2018), 395 final, Consulté le 31 octobre 2022 sur (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0395&from=PL>) consulté le 3 novembre 2022.
- Commission européenne, 2019, Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions, Le Green Deal européen, COM (2019), 640 final, Consulté le 31 octobre 2022 sur (https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF) consulté le 3 novembre 2022.
- Commission européenne, 2021, Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions. Stratégie de financement de la transition vers une économie durable, COM(2021), 390 final. Consulté le 31 octobre 2022 à l'adresse suivante : (https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9f5e7e95-df06-11eb-895a-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF) consulté le 3 novembre 2022
- Conseil européen, 2000, Directive 2000/55/CE du Parlement européen et du Conseil du 18 septembre 2000 établissant des exigences de rendement énergétique applicables aux ballasts pour l'éclairage fluorescent, 32000L0055 33 (2000).
- Falchi, F. et Bará, S. 2021, *Computing light pollution indicators for environmental assessment*, Natural Sciences, 1(2), (<https://doi.org/10.1002/ntls.10019>) consulté le 3 novembre 2022.
- Falchi, F. et al., 2016, *The new world atlas of artificial night sky brightness*, Science Advances, 2(6), e1600377, (<https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377>) consulté le 3 novembre 2022.

- Falcón, J. et al, 2020, *Exposure to Artificial Light at Night and the Consequences for Flora, Fauna, and Ecosystems*, *Frontiers in Neuroscience*, 14, 602796, (<https://doi.org/10.3389/fnins.2020.602796>)
- Ffrench-Constant, R. H. et al., 2016, *Light pollution is associated with early tree budburst across the United Kingdom*, *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, 283(1833), 20160813, (<https://doi.org/10.1098/rspb.2016.0813>) consulté le 3 novembre 2022.
- Fiorentin, P. et al, 2005, *Characterization and Calibration of a CCD Detector for Light Engineering*, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 54(1), 171-177. (<https://doi.org/10.1109/TIM.2004.834055>) consulté le 3 novembre 2022.
- Firebaugh, A. et Haynes, K. J., 2016, *Experimental tests of light-pollution impacts on nocturnal insect courtship and dispersal*, *Oecologia*, 182(4), 1203-1211, (<https://doi.org/10.1007/s00442-016-3723-1>) consulté le 3 novembre 2022.
- Fobert, E. K., et al, 2019, *Artificial light at night causes reproductive failure in clownfish*, *Biology Letters*, 15(7), 20190272, (<https://doi.org/10.1098/rsbl.2019.0272>) consulté le 3 novembre 2022.
- Fonken, L. K. et Nelson, R. J., 2013, *Dim light at night increases depressive-like responses in male C3H/HeNHsd mâles*, *Behavioural Brain Research*, 243, 74-78. (<https://doi.org/10.1016/j.bbr.2012.12.046>) consulté le 3 novembre 2022.
- Fonken, L. K. et al, 2010, *Light at night increases body mass by shifting the time of food intake*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(43), 18664-18669. (<https://doi.org/10.1073/pnas.1008734107>) consulté le 3 novembre 2022.
- Fryc, I. et al, 2021, *On the Relation between the Astronomical and Visual Photometric Systems in Specifying the Brightness of the Night Sky for Mesopically Adapted Observers*, *LEUKOS*, 1-12. (<https://doi.org/10.1080/15502724.2021.1921593>) consulté le 3 novembre 2022.
- Gallaway, T. et al., 2010, *The economics of global light pollution*, *Ecological Economics*, 69(3), 658-665, (<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.10.003>) consulté le 3 novembre 2022.
- Garstang, R. H., 1986, *Model for Artificial Night-Sky Illumination*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 98, 364, (<https://doi.org/10.1086/131768>) consulté le 3 novembre 2022.
- Gaston, K. J. et al, 2013, *The ecological impacts of nighttime light pollution : A mechanistic appraisal : Nighttime light pollution*, *Biological Reviews*, 88(4), 912-927, (<https://doi.org/10.1111/brv.12036>) consulté le 3 novembre 2022.
- Gaston, K. J. et al, 2012, *REVIEW : Reducing the ecological consequences of night-time light pollution : options and developments*, *Journal of Applied Ecology*, 49(6), 1256-1266, (<https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02212.x>) consulté le 3 novembre 2022.
- Globe at Night-Sky Brightness Monitoring Network, 2022, *Light pollution measurement*, Retrieved 04 March, 2022 from (<https://www.globeatnight.org>) accessed 3 November 2022.
- Gorelick, N. et al, 2017, *Google Earth Engine : Planetary-scale geospatial analysis for everyone*, *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27, (<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>) consulté le 3 novembre 2022.
- Grunst, M. L. et al, 2020, *Early-life exposure to artificial light at night elevates physiological stress in free-living songbirds☆*, *Environnement Pollution*, 259, 113895, (<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113895>) consulté le 3 novembre 2022.
- Guanglei, W. et al, 2019, *A Comparative Study on Current Outdoor Lighting Policies in China and Korea : A Step toward a Sustainable Nighttime Environment*, *Sustainability*, 11(14), 3989. (<https://doi.org/10.3390/su11143989>) consulté le 3 novembre 2022.
- Haddock, S. H. D. et al., 2010, *Bioluminescence in the Sea*, *Annual Review of Marine Science*, 2(1), 443-493, (<https://doi.org/10.1146/annurev-marine.120308-081028>) consulté le 3 novembre 2022.
- Hale, J. et & Arlettaz, R., 2019, 'Eclairage artificiel et biodiversité en Suisse', 140.
- Hale, J. et al, 2018, 'Ecological light pollution in the Naturpark Gantrisch' (Technical Report No. V3 ; pp. 1-

- 49), Conservation Biology Division, Université de Berne.
- Hänel, A. et al, 2018, *Measuring night sky brightness : Methods and challenges*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 205, 278-290, (<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.09.008>) consulté le 3 novembre 2022.
- Harb, F. et al, 2015, *Le manque d'exposition à la lumière naturelle dans l'espace de travail est associé à des troubles physiologiques, du sommeil et de l'humeur. et dépressifs*, Chronobiology International, 32(3), 368-375, (<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3109/07420528.2014.982757?journalCode=icbi20>) consulté le 7 novembre 2022.
- Hecker, S. et al, 2018, *Citizen Science : Innovation in Open Science, Society and Policy*. UCL Press. (<https://doi.org/10.2307/j.ctv550cf2>) consulté le 3 novembre 2022.
- Hölker, F. et al, 2010, *The Dark Side of Light : A Transdisciplinary Research Agenda for Light Pollution Policy*, Ecology and Society, 15(4), art13, (<https://doi.org/10.5751/ES-03685-150413>) consulté le 3 novembre 2022.
- Honnen, A.-C. et al, 2016, *Sex-specific gene expression in the mosquito Culex pipiens f. Molestus in response to artificial light at night*. BMC Genomics, 17(1), 22, (<https://doi.org/10.1186/s12864-015-2336-0>) consulté le 3 novembre 2022.
- Huang, Q. et al, 2014, *Application of DMSP/OLS Nighttime Light Images : A Meta-Analysis and a Systematic Literature Review*, Remote Sensing, 6(8), 6844-6866. (<https://doi.org/10.3390/rs6086844>) consulté le 3 novembre 2022.
- Hügli, F., 2021, 'Light pollution in European protected areas-Spatial variation of light pollution in Natura 2000 sites of the Member states of the European Union' [Master thesis in Environmental Science], ETH Zurich.
- CIRC, 2020, Night shift work, IARC Monogr Identifog Carcinog Hazards Hum, 124:1-371.
- IDA, 2014, *International Dark-Sky Association*. Association internationale du ciel étoilé. ETH Zurich. Consulté le 28 février 2022, à partir de (<https://darksky.org/>) consulté le 3 novembre 2022.
- Jechow, A. et al, 2021, *Mimicking skyglow at ecosystemlevel in a large-scale lake enclosure facility*, Scientific Reports, 11(23478), (<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-804654/v1>) consulté le 3 novembre 2022.
- Jones, R. R., 2021, *Exposition à la lumière artificielle la nuit et risque de cancer : Where do we go from here ?* British Journal of Cancer, 124(9), 1467-1468, (<https://doi.org/10.1038/s41416-020-01231-7>) consulté le 3 novembre 2022.
- Kanianska, R. et al, 2020, *Landscape Potential and Light Pollution as Key Factors for Astrotourism Development : A Case Study of a Slovak Upland Region*, Land, 9(10), 374, (<https://doi.org/10.3390/land9100374>) consulté le 3 novembre 2022.
- Keshet-Sitton, A. et al, 2016, *Can Avoiding Light at Night Reduce the Risk of Breast Cancer ?* Integrative Cancer Therapies, 15(2), 145-152, (<https://doi.org/10.1177/1534735415618787>) consulté le 3 novembre 2022.
- Kim, M. et al, 2018, *Short-term exposure to dim light at night disrupts rhythmic behaviors and causes neurodegeneration in fly models of tauopathy and Alzheimer's disease*, Biochemical and Biophysical Recherche Communications, 495(2), 1722-1729, (<https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2017.12.021>) consulté le 3 novembre 2022.
- Kim, M. Y. et al., 2012, *Divergence of flowering genes in soybean*, Journal of Biosciences, 37(5), 857-870, (<https://doi.org/10.1007/s12038-012-9252-0>) consulté le 3 novembre 2022.
- Kliukiene, J. et al, 2001, *Risk of breast cancer among Norwegian women with visual impairment*, British Journal of Cancer, 84(3), 397-399, (<https://doi.org/10.1054/bjoc.2000.1617>) consulté le 3 novembre 2022.

- Kocifaj, M. et Barentine, J. C., 2021, *Air pollution mitigation can reduce the brightness of the night sky in and near cities*. Scientific Reports, 11(1), 14622, (<https://doi.org/10.1038/s41598-021-94241-1>) consulté le 3 novembre 2022.
- Kyba, C. C. M. et al, 2017, *Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent*, Science Advances, 3(11), e1701528, (<https://doi.org/10.1126/sciadv.1701528>) consulté le 3 novembre 2022.
- Kyba, C. C. M. et al, 2011, *Cloud Coverage Acts as an Amplifier for Ecological Light Pollution in Urban Ecosystems*, PLoS ONE, 6(3), e17307, (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017307>) consulté le 3 novembre 2022.
- Kyba, C. et al, 2014, *High-Resolution Imagery of Earth at Night : New Sources, Opportunities and Challenges*. Remote Sensing, 7(1), 1-23, (<https://doi.org/10.3390/rs70100001>) consulté 3 novembre 2022.
- Laforge, A. et al, 2019, *Reducing light pollution improves connectivity for bats in urban landscapes*, Landscape Ecology, 34(4), 793-809, (<https://doi.org/10.1007/s10980-019-00803-0>) consulté le 3 novembre 2022.
- Lamphar, H., 2020, *Spatio-temporal association of light pollution and urban sprawl using remote sensing imagery and GIS : A simple method based in Otsu's algorithm*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 251, 107060, (<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107060>) accessed 3 novembre 2022.
- Lamphar, H. et al, 2022, *Light pollution as a factor in breast and prostate cancer*, Science of The Total Environment, 806, 150918, (<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150918>) accessed 4 novembre 2022.
- Lao, S. et al, 2020, *The influence of artificial light at night and polarized light on bird-building collisions*, Biological Conservation, 241, 108358, (<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108358>) accessed 4 novembre 2022.
- Lapostolle, D. et Challéat, S., 2021, *Making Darkness a Place-Based Resource : How the Fight against Light Pollution Reconfigures Rural Areas in France*, Annals of the American Association of Geographers, 111(1), 196-215, (<https://doi.org/10.1080/24694452.2020.1747972>) consulté le 4 novembre 2022.
- Li, X. et al, 2020, *A harmonized global nighttime light dataset 1992-2018*, Scientific Data, 7(1), 168, (<https://doi.org/10.1038/s41597-020-0510-y>) consulté le 4 novembre 2022.
- Lim, H. et al, 2018, *The Reality of Light Pollution : A Field Survey for the Determination of Lighting Environmental Management Zones in South Korea*, Sustainability, 10(2), 374, (<https://doi.org/10.3390/su10020374>) consulté le 4 novembre 2022.
- Liu, Z. et al, 2020, *Light Pollution Changes the Toxicological Effects of Cadmium on Microbial Community Structure and Function Associated with Leaf Litter Decomposition*, International Journal of Molecular Sciences, 21(2), 422, (<https://doi.org/10.3390/ijms21020422>) consulté le 4 novembre 2022.
- Longcore, T. et Rich, C., 2004, *Ecological light pollution*, Frontiers in Ecology and the Environment, 2(4), 191-198, ([https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0191:ELP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0191:ELP]2.0.CO;2)) consulté le 4 novembre 2022.
- Lübke, D. et al, 2021, *Comparing and Quantifying Indoor Performance of Organic Solar Cells*, Advanced Energy Materials, 11(34), 2101474, (<https://doi.org/10.1002/aenm.202101474>) accessed 4 novembre 2022.
- Lyytimäki, J., 2020, *Cartes de la pollution lumineuse dans des endroits bizarres : Les images satellites nocturnes nous font-elles oublier l'obscurité naturelle ?* 11.

- Marín, C. et al, 2009, Chapitre 16 : "Fenêtres sur l'Univers" : La lumière des étoiles, les zones de ciel étoilé et les observatoires
Sites. *Etude thématique de l'ICOMOS-IAU sur le patrimoine astronomique*, 238-246.
- May, D. et al, 2019, *The effect of intensified illuminance and artificial light at night on fitness and susceptibility to abiotic and biotic stressors*, *Environmental Pollution*, 251, 600-608, (<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.016>) consulté le 4 novembre 2022.
- Min, J. et Min, K., 2018, *Outdoor light at night and the prevalence of depressive symptoms and suicidal behaviors : A cross-sectional study in a nationally representative sample of Korean adults*, *Journal of Affective Disorders*, 227, 199-205, (<https://doi.org/10.1016/j.jad.2017.10.039>) consulté le 4 novembre 2022.
- Ministerio de la Presidencia y para las administraciones territoriales, 2017, La Ley 31/1988, de 31 de octubre, sobre Protección de la Calidad Astronómica de los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias, 156/7585 (2017).
- Ministre de la transition écologique et solidaire, 2018, Arrêté du 27 décembre 2018 relatif à la prévention, à la réduction et à la limitation des nuisances lumineuses, TREP1831126A JORF n°0300 du 28 décembre 2018 (2018).
- Ministère de l'économie et du développement durable, 2020, NN 128/2020 (20.11.2020.), Pravidnik o zonama rasvijetljenosti, dopuštenim vrijednostima rasvijetljanja i načinima upravljanja rasvijetnim sustavima. NN 128/2020 - Ordonnance sur les zones d'éclairage, les valeurs d'éclairage autorisées et les méthodes de gestion des systèmes d'éclairage.
- Ministère de l'environnement de la République tchèque, 2022, Light pollution reduction measures in Europe, document de travail pour l'atelier international Light Pollution 2022, pendant la présidence tchèque du Conseil de l'Union européenne. 1-60.
- Molina-Moreno, V. et al, 2018, *The Use of Led Technology and Biomass to Power Public Lighting in a Local Context : The Case of Baeza (Spain)*, *Energies*, 11(7), 1783, (<https://doi.org/10.3390/en11071783>) consulté le 4 novembre 2022.
- Moore, C. et al., 2013, *Recommended Indicators and Thresholds of Night Sky Quality for NPS State of the Park Reports* (pp. 1-10).
- Moradkhani, F. et al, 2020, *Immunoregulatory role of melatonin in cancer*. *Journal of Cellular Physiology*, 235(2), 745-757, (<https://doi.org/10.1002/jcp.29036>) consulté le 4 novembre 2022.
- Murphy, S. M. et al, 2022, *Light pollution affects invasive and native plant traits important to plant competition and herbivorous insects*, *Biological Invasions*, 24(3), 599-602, (<https://doi.org/10.1007/s10530-021-02670-w>) consulté le 4 novembre 2022.
- Nadybal, S. M. et al, 2020, *Light pollution inequities in the continental United States : A distributive environmental justice analysis*, *Environmental Research*, 189, 109959, (<https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109959>) consulté le 4 novembre 2022.
- Naylor, E., 2001, *Marine Animal Behaviour in Relation to Lunar Phase*. *Earth, Moon and Planet*, 85-86, 291-302, (https://doi.org/10.1007/978-94-010-0800-6_26) consulté le 4 novembre 2022.
- Ngadiman, N. F. et al, 2021, *Zenithal Sky Brightness Measurement at Selangor Observatory*, *Journal of Physics : Conference Series*, 1768(1), 012015, (<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1768/1/012015>) consulté le 7 novembre 2022.
- Obayashi, K. et al, 2019, *Indoor light pollution and progression of carotid atherosclerosis : A longitudinal study of the HEIJO-KYO cohort*, *Environment International*, 133, 105184, (<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105184>) consulté le 7 novembre 2022.
- ORISON, 2022, 'Observing from the Stratosphere', Consulté le 04 mars 2022 sur orison.iaa.es

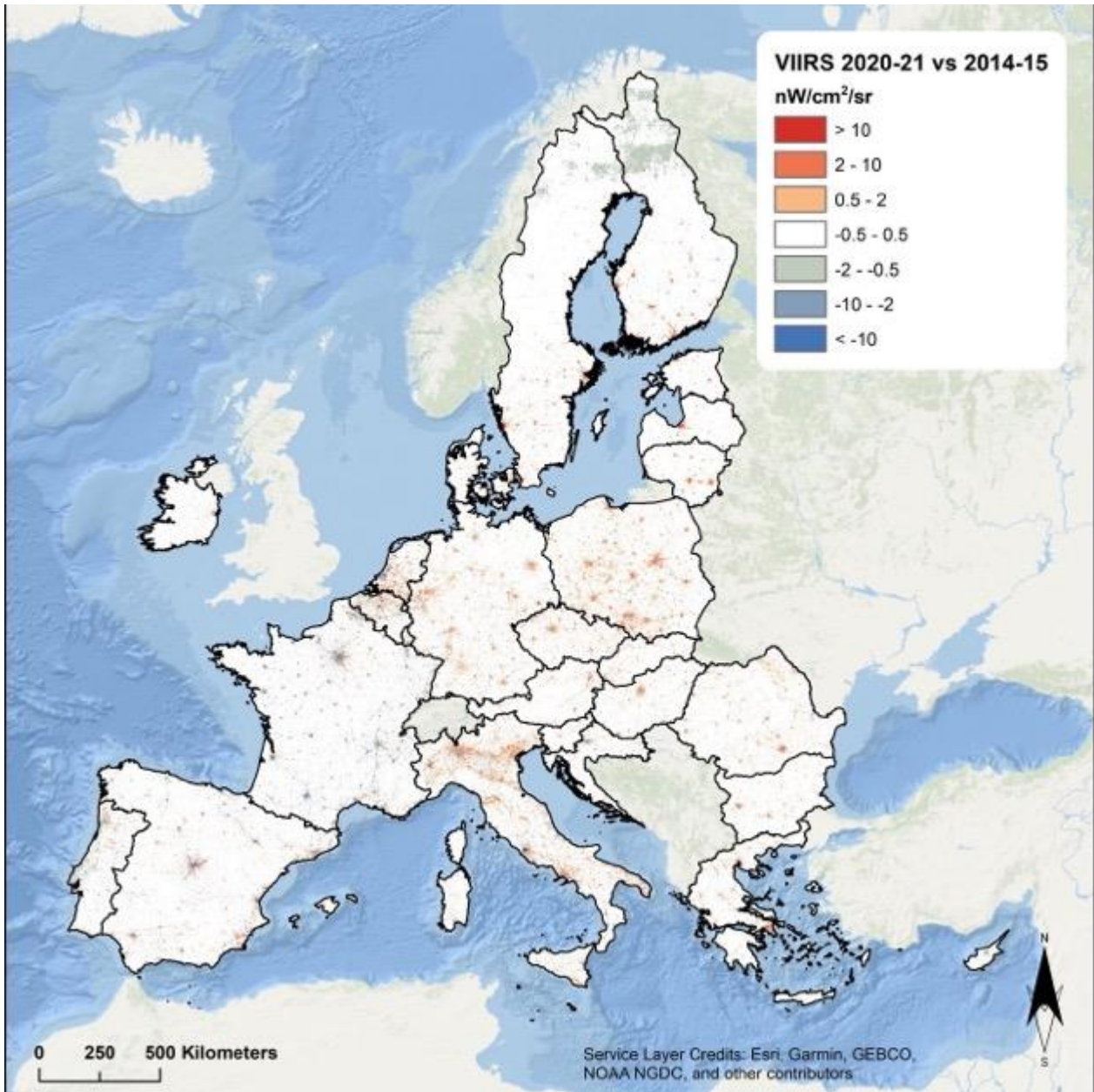
- Ostrin, L. A., 2019, *Ocular and systemic melatonin and the influence of light exposure*, Clinical and Experimental Optometry, 102(2), 99-108, (<https://doi.org/10.1111/cxo.12824>) consulté le 7 novembre 2022.
- Ouyang, J. Q. et al, 2015, *Stressful colours : Corticosterone concentrations in a free-living songbird vary with the spectral composition of experimental illumination*, Biology Letters, 11(8), 20150517, (<https://doi.org/10.1098/rsbl.2015.0517>) consulté le 7 novembre 2022.
- Parent, M.-E. et al., 2012, *Night Work and the Risk of Cancer Among Men*, American Journal of Epidemiology, 176(9), 751-759, (<https://doi.org/10.1093/aje/kws318>) consulté le 7 novembre 2022.
- Parlement Wallon, 2019, PROPOSITION DE RÉSOLUTION visant à réduire la consommation énergétique et la pollution lumineuse liées à l'éclairage nocturne non résidentiel, 1298 (2018-2019) - N° 1, (http://nautilus.parlement-wallon.be/Archives/2018_2019/RES/1298_1.pdf) consulté 31 octobre 2022.
- Patel, P. C., 2019, *Pollution lumineuse et sommeil insuffisant : Evidence from the United States*. American Journal of Human Biology, 31(6), (<https://doi.org/10.1002/ajhb.23300>) consulté le 7 novembre 2022.
- Paul, K. N. et al, 2009, *The role of retinal photoreceptors in the regulation of circadian rhythms*, Reviews in Endocrine and Metabolic Disorders, 10(4), 271-278, (<https://doi.org/10.1007/s11154-009-9120-x>) consulté le 7 novembre 2022.
- Pawson, S. M. et Bader, M. K.-F, 2014, *LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature*, Ecological Applications, 24(7), 1561-1568, (<https://doi.org/10.1890/14-0468.1>) consulté le 7 novembre 2022.
- Peña-García, A. et Sędziwy, A., 2020, *Optimisation de l'éclairage des routes rurales et des zones protégées avec la lumière blanche : Un compromis entre la pollution lumineuse, les économies d'énergie et la visibilité*. LEUKOS, 16(2), 147- 156, (<https://doi.org/10.1080/15502724.2019.1574138>) consulté le 7 novembre 2022.
- Pérez Díaz, C. L. et al, 2021, *S-NPP VIIRS Thermal Emissive Bands 10-Year On-Orbit Calibration and Performance*, Remote Sensing, 13(19), 3917, (<https://doi.org/10.3390/rs13193917>) accessed 7 novembre 2022.
- Poot, H. et al., 2008, *Green Light for Nocturnally Migrating Birds*, Ecology and Society, 13(2), art47, (<https://doi.org/10.5751/ES-02720-130247>) consulté le 7 novembre 2022.
- Posch, T. et al., 2018, *Systematic measurements of the night sky brightness at 26 locations in Eastern Austria*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 211, 144-165, (<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.03.010>) consulté le 7 novembre 2022.
- Rand, A. S. et al, 1997, *Light Levels Influence Female Choice in Túngara Frogs : Predation Risk Assessment ?* Copeia, 1997(2), 447, (<https://doi.org/10.2307/1447770>) consulté le 7 novembre 2022.
- Reiter, R. J. et al, 2007, *Light at Night, Chronodisruption, Melatonin Suppression, and Cancer Risk : A Review*. Critical Reviews™ in Oncogenesis, 13(4), 303-328, (<https://doi.org/10.1615/CritRevOncog.v13.i4.30>) consulté le 7 novembre 2022.
- Robert, K. A. et al, 2015, *Artificial light at night desynchronizes strictly seasonal reproduction in a wild mammal*, Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences, 282(1816), 20151745, (<https://doi.org/10.1098/rspb.2015.1745>) consulté le 7 novembre 2022.
- Rodrigo-Comino, J. et al, 2021, *Light pollution : A review of the scientific literature*, The Anthropocene Review, 205301962110512, (<https://doi.org/10.1177/20530196211051209>) consulté 7 novembre 2022.
- Rybnikova, N. A. et al, 2016, *L'exposition à la lumière artificielle pendant la nuit contribue-t-elle à la pandémie mondiale d'obésité ?* International Journal of Obesity, 40(5), 815-823, (<https://doi.org/10.1038/ijo.2015.255>) consulté le 7 novembre 2022.

- Rydell, J. et al, 2017, *Age of enlightenment : Long-term effects of outdoor aesthetic lights on bats in churches*, Royal Society Open Science, 4(8), 161077, (<https://doi.org/10.1098/rsos.161077>) consulté le 7 novembre 2022.
- Sanders, D. et al, 2021, *A meta-analysis of biological impacts of artificial light at night*, Nature Ecology & Evolution, 5(1), 74-81, (<https://doi.org/10.1038/s41559-020-01322-x>) consulté le 7 novembre 2022.
- Schlicht, L. et al, 2014, *Pas de relation entre le temps d'émergence de la femelle du perchoir et la paternité extrapair.* *paternité extrapair*, Comportemental Ecology, 25(3), 650-659, (<https://doi.org/10.1093/beheco/aru035>) consulté le 7 novembre 2022.
- Schreuder, D. A., 1986, 'Light Trespass : Causes, Remedies and Actions', *document présenté à la conférence CIE/MBE Symposium "Eclairage et signalisation pour les transports"*, 27.
- Sciezor, T. et al, 2012, "Light Pollution of the Mountain Areas in Poland", 38(4), 59-69. (<https://doi.org/10.2478/v10265-012-0042-4>) consulté le 7 novembre 2022.
- Seaman, C. J. et Miller, S. D., 2013, *VIIRS Captures Aurora Motions*, Bulletin of the American Meteorological Society, 94(10), 1491-1493, (<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00221.1>) consulté le 5 novembre 2022.
- Simoneau, A. et al, 2020, 'Multispectral analysis of the night sky brightness and its origin for the Asiago Observatory, Italy', *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491(3), 4398-4405, (<https://doi.org/10.1093/mnras/stz3406>) consulté le 7 novembre 2022.
- Škvareninová, J. et al., 2017, *Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment*, Moravian Geographical Reports, 25(4), 282-290, (<https://doi.org/10.1515/mgr-2017-0024>) consulté le 7 novembre 2022.
- Smith, H., 1982, 'Light Quality, Photoperception, and Plant Strategy' *Annual Review of Plant Physiology*, 33(1), 481-518, (<https://doi.org/10.1146/annurev.pp.33.060182.002405>) consulté le 7 novembre 2022.
- Stracey, C. M. et al, 2014, *Light Pollution Allows the Northern Mockingbird (Mimus polyglottos) to Feed Nestlings After Dark*, The Wilson Journal of Ornithology, 126(2), 366-369, (<https://doi.org/10.1676/13-107.1>) consulté le 7 novembre 2022.
- Tanner, J. E., 1996, *Seasonality and lunar periodicity in the reproduction of Pocilloporid corals*, Coral Reefs, 15(1), 59-66, (<https://doi.org/10.1007/bf01626077>) consulté le 7 novembre 2022.
- Teikari, P., 2007, 'Light Pollution : Definition, legislation, measurement, modeling and environmental effects', *Light Pollution Modelling*, 72.
- Testa, F. et al, 2016, *Drawbacks and opportunities of green public procurement : An effective tool for sustainable production*, Journal of Cleaner Production, 112, 1893-1900, (<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.092>) consulté le 7 novembre 2022.
- Gouvernement de la République de Slovénie, 2004, "Loi sur la protection de l'environnement (ZVO-1) SOP-2004- 01-1694", *URADNI LIST Republike Slovenije*, 1-116.
- Parlement de la République tchèque, 2002, "Loi sur la protection de l'atmosphère et modification de certaines autres lois (loi sur la pureté de l'air)".
- Touzot, M. et al, 2022, *Transcriptome-wide deregulation of gene expression by artificial light at night in tadpoles of common toads*, Science of The Total Environment, 818, 151734, (<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151734>) consulté le 7 novembre 2022.

- Touzot, M. et al, 2020, La lumière artificielle nocturne modifie le comportement sexuel et le succès de la fécondation du crapaud commun. *crapaud commun, Environnement Pollution*, 259, 113883, (<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113883>) consulté le 7 novembre 2022.
- Unit Converter 2022, "Convert lumen/meter² [lm/m²] to watt/centimeter² (at 555nm) [W/cm² (at 555 nm)]", ([https://www.translatorscafe.com/unit-converter/en-US/illumination/8-11/lumen/meter2-watt/centimeter2%20\(at%20555%20nm\)/](https://www.translatorscafe.com/unit-converter/en-US/illumination/8-11/lumen/meter2-watt/centimeter2%20(at%20555%20nm)/)) consulté le 7 novembre 2022.
- Villamizar, N. et al., 2011, *Effects of light during early larval development of some aquacultured teleosts : A review*, *Aquaculture*, 315(1-2), 86-94, (<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.10.036>) consulté le 7 novembre 2022.
- Viola, A. U. et al, 2008, *Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality*, *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 34(4), 297-306, (<https://www.jstor.org/stable/40967721>) consulté le 7 novembre 2022.
- Wang, Z., et al, 2021, *Quantifying uncertainties in nighttime light retrievals from Suomi-NPP and NOAA-20 VIIRS Day/Night Band data*, *Remote Sensing of Environment*, 263, 112557. (<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112557>) consulté le 5 novembre 2022.
- Weiler, R. et al, 1997, *Modulation de la libération de dopamine endogène dans la rétine du poisson par la lumière et l'obscurité prolongée. l'obscurité prolongée*, *Neurosciences*, 14(2), 351-356, (<https://doi.org/10.1017/S0952523800011470>) consulté le 7 novembre 2022.
- Wei-Chung C. et Pedram, M., 2004, *Power minimization in a backlit TFT-LCD display by concurrent brightness and contrast scaling*, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 50(1), 25-32, (<https://doi.org/10.1109/TCE.2004.1277837>) consulté le 7 novembre 2022.
- Witherington, B. E. et Martin, R. E., 2003, "Understanding, Assessing, and Resolving Light-Pollution Problems on Sea Turtle Nesting Beaches", *Florida Marine Research Institute Technical Report*, 3e édition, (TR-2), 1-73.
- Ziegler, A.-K. et al, 2021, *Exposure to artificial light at night alters innate immune response in wild great tit nestlings*, *Journal of Experimental Biology*, 224(10), jeb239350, (<https://doi.org/10.1242/jeb.239350>) consulté le 7 novembre 2022.

Annexe

Figure A1 : Les différences de luminosité dans les pays membres de l'UE27 entre les périodes de calcul de la moyenne de (2020/21) et (2014/15)

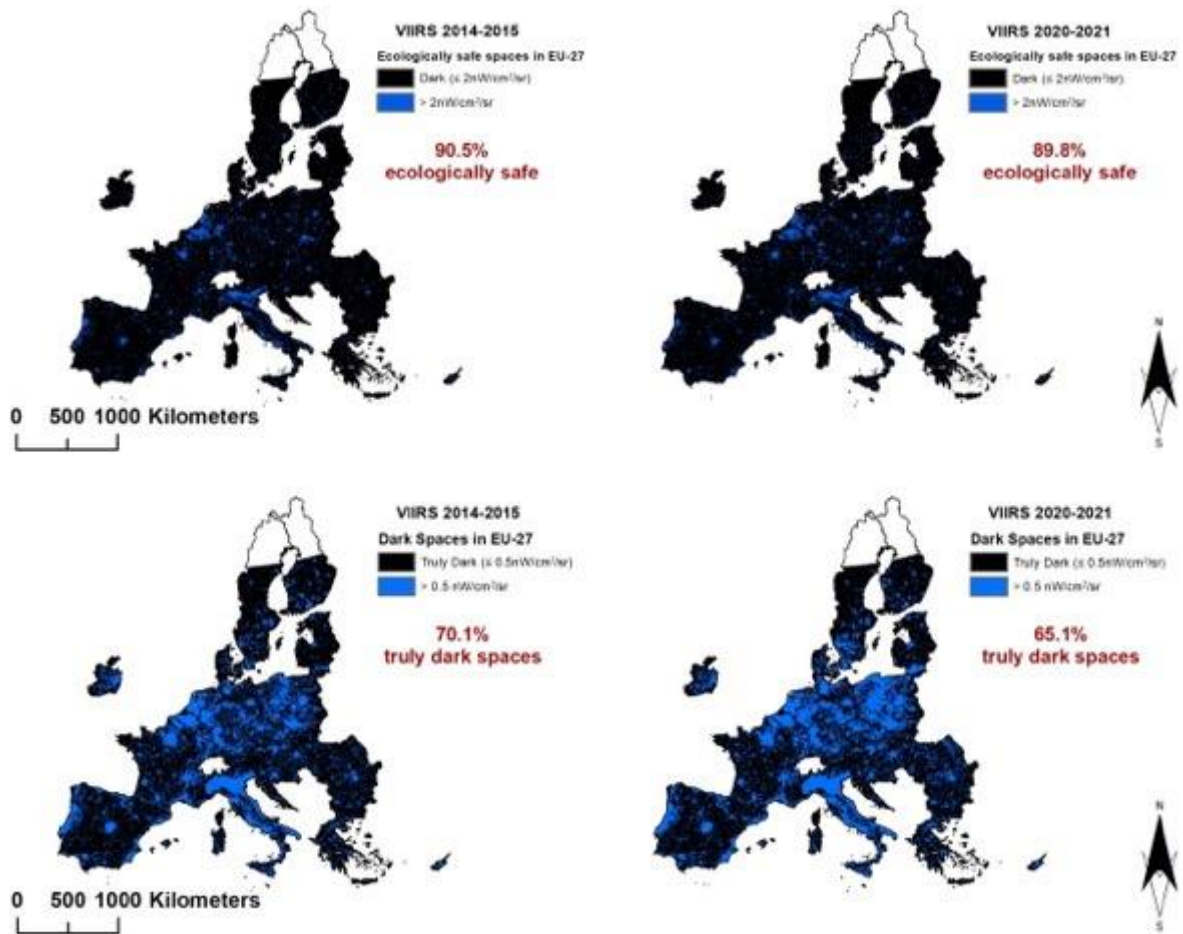


Notes : Évolution de la luminosité dans les pays européens de l'UE27 au cours des huit dernières années, calculée comme la différence entre les émissions lumineuses moyennes en 2014/15 et en 2020/21. Les valeurs d'augmentation (couleur rouge) ou de diminution (couleur bleue) de la lumière artificielle varient entre 0,5 et 10 nW/cm²/sr. La couleur blanche indique qu'il n'y a pas de changement (c'est-à-dire que les différences sont inférieures à

+/- 0,5 nW/cm²/sr). Les zones zoomées représentent certaines des subdivisions de niveau 1 de la nomenclature des unités territoriales statistiques (NUTS 1) de l'Union européenne.

Source : Swiss TPH.

Figure A2 : Signaux de pollution lumineuse écologique pour les pays de l'UE27. Les cartes du haut indiquent des zones "écologiquement sûres" ($< 2 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$) et en bas des espaces "vraiment sombres" ($< 0.5 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$)



Notes : La surface terrestre avec des émissions lumineuses $< 2 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ (cartes supérieures)/ $< 0,5 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ (cartes inférieures) est représentée en noir et les zones avec des émissions plus élevées en bleu (l'exclusion de la région du Nord est représentée en blanc en raison de l'effet de confusion des lumières Aurora) - une comparaison entre les deux périodes de temps 2014/15 et 2020/21.

Source : Swiss TPH.

Tableau A1 : Moyenne annuelle des émissions lumineuses entre 2014 et 2021 pour chaque pays de l'EEE38 sur la base de l'ensemble de données VIIRS

Country	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Albania	0.67	0.58	0.53	0.57	0.55	0.62	0.71	0.84
Austria	0.77	0.75	0.75	0.78	0.76	0.77	0.78	0.95
Bosnia and Herzegovina	0.57	0.55	0.56	0.58	0.54	0.60	0.61	0.77
Belgium	4.76	4.72	4.68	4.59	4.77	4.71	4.74	4.85
Bulgaria	0.56	0.51	0.51	0.57	0.50	0.53	0.57	0.68
Switzerland	1.23	1.24	1.20	1.20	1.11	1.13	1.12	1.23
Denmark	0.97	1.04	1.04	0.99	1.00	0.97	1.05	1.35
Spain	1.54	1.48	1.43	1.42	1.38	1.41	1.40	1.50
Estonia	0.76	0.68	0.81	0.65	0.70	0.83	0.70	1.01
Greece	1.12	1.09	1.08	1.15	1.11	1.18	1.24	1.34
Cyprus	2.21	2.20	2.22	2.31	2.35	2.22	2.09	2.15
Czechia	1.29	1.31	1.33	1.40	1.37	1.40	1.28	1.75
Germany	1.30	1.32	1.28	1.29	1.31	1.29	1.35	1.56
France	1.55	1.52	1.46	1.39	1.36	1.31	1.32	1.34
Finland	0.89	0.97	1.02	0.88	0.83	0.86	0.69	0.99
Croatia	1.22	1.14	1.16	1.20	1.14	1.13	1.11	1.24
Hungary	0.88	0.80	0.82	0.82	0.82	0.86	0.86	1.03
Ireland	0.99	0.99	0.95	0.86	0.93	0.88	0.89	0.93
Iceland	1.60	1.25	1.02	1.00	0.69	0.62	0.71	0.72
Italy	3.00	2.96	2.95	3.05	2.95	3.03	3.02	3.13
Liechtenstein	1.59	1.70	1.71	1.79	1.71	1.60	1.66	1.81
Lithuania	0.55	0.57	0.65	0.53	0.60	0.64	0.61	1.01
Luxembourg	3.29	3.29	3.31	3.32	3.53	3.31	3.35	3.59
Latvia	0.47	0.55	0.45	0.46	0.55	0.53	0.53	0.80
North Macedonia	0.67	0.64	0.60	0.63	0.57	0.64	0.68	0.82
Malta	14.60	14.29	14.03	14.63	14.43	14.52	14.73	14.71
Montenegro	0.69	0.70	0.65	0.68	0.64	0.69	0.69	0.84
Netherlands	7.17	6.84	6.77	6.61	6.66	6.63	6.38	6.29
Norway	0.84	0.88	0.95	0.84	0.76	0.77	0.69	0.87
Romania	0.66	0.58	0.59	0.58	0.60	0.62	0.65	0.82
Serbia	1.15	1.10	1.14	1.16	1.16	1.31	1.24	1.47
Poland	1.39	1.31	1.37	1.35	1.42	1.41	1.35	1.92
Portugal	2.29	2.32	2.34	2.29	2.19	2.19	2.02	2.04
Sweden	0.72	0.80	0.82	0.68	0.66	0.61	0.58	0.79
Slovenia	0.91	0.84	0.84	0.84	0.85	0.79	0.83	0.97
Slovakia	0.83	0.81	0.83	0.84	0.81	0.85	0.83	1.05
Turkey	0.90	0.95	1.00	1.12	1.10	1.24	1.30	1.45
United Kingdom	2.12	2.17	1.98	1.80	1.84	1.74	1.74	1.85
EEA38_average	1.25	1.25	1.25	1.21	1.19	1.20	1.18	1.36

Tableau A3 : Moyenne annuelle des émissions lumineuses entre 2000 et 2020 pour chaque pays de l'EEE38 sur la base des séries chronologiques historiques étendues

Country	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Albania	0.02	0.02	0.05	0.05	0.07	0.07	0.06	0.07	0.09	0.06	0.08	0.16	0.21	0.36	0.36	0.32	0.29	0.36	0.38	0.43	0.46
Austria	0.25	0.29	0.28	0.29	0.18	0.29	0.27	0.22	0.24	0.23	0.32	0.30	0.44	0.33	0.35	0.29	0.38	0.46	0.48	0.45	0.39
Bosnia and Herzegovina	0.08	0.07	0.07	0.10	0.05	0.12	0.07	0.07	0.09	0.06	0.10	0.13	0.25	0.24	0.27	0.25	0.30	0.35	0.35	0.37	0.35
Belgium	2.34	2.40	2.44	2.73	1.26	1.84	1.66	1.71	2.10	1.86	2.42	2.21	3.51	3.52	3.41	3.19	3.42	3.57	3.77	3.49	3.22
Bulgaria	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07	0.10	0.09	0.09	0.11	0.08	0.10	0.15	0.23	0.27	0.27	0.28	0.29	0.35	0.33	0.34	0.34
Switzerland	0.47	0.42	0.52	0.73	0.38	0.71	0.46	0.54	0.54	0.50	0.71	0.59	0.81	0.64	0.73	0.66	0.74	0.78	0.74	0.77	0.69
Denmark	0.34	0.31	0.18	0.32	0.25	0.27	0.29	0.27	0.19	0.19	0.52	0.23	0.38	0.31	0.24	0.14	0.43	0.35	0.39	0.38	0.33
Spain	0.53	0.57	0.65	0.63	0.56	0.64	0.75	0.81	0.69	0.69	0.57	0.94	1.03	1.15	1.13	1.10	1.10	1.16	1.13	1.15	1.05
Estonia	0.03	0.06	0.00	0.11	0.06	0.11	0.13	0.11	0.11	0.12	0.22	0.11	0.18	0.11	0.10	0.04	0.13	0.09	0.15	0.13	0.04
Greece	0.33	0.28	0.38	0.34	0.34	0.37	0.42	0.43	0.36	0.35	0.34	0.44	0.56	0.77	0.75	0.74	0.76	0.89	0.87	0.93	0.94
Cyprus	0.74	0.75	0.88	0.82	0.77	0.73	1.18	1.22	1.06	0.92	1.14	1.24	1.30	1.82	1.85	1.86	1.90	2.08	2.15	1.99	1.85
Czechia	0.34	0.46	0.59	0.43	0.24	0.42	0.37	0.27	0.30	0.30	0.58	0.37	0.69	0.59	0.68	0.53	0.65	0.80	0.83	0.81	0.70
Germany	0.56	0.55	0.63	0.65	0.39	0.50	0.44	0.45	0.47	0.45	0.77	0.53	0.72	0.55	0.65	0.61	0.64	0.69	0.78	0.70	0.69
France	0.47	0.54	0.54	0.62	0.41	0.50	0.53	0.54	0.48	0.47	0.51	0.65	0.80	0.94	0.98	0.93	0.97	0.96	0.93	0.86	0.83
Finland				0.18	0.10	0.10	0.13	0.10	0.12	0.13	0.19	0.09	0.19	0.08	0.05	0.00	0.08	0.08	0.00	0.15	0.04
Croatia	0.16	0.15	0.17	0.26	0.14	0.29	0.24	0.24	0.24	0.22	0.28	0.29	0.63	0.67	0.74	0.66	0.77	0.86	0.82	0.82	0.74
Hungary	0.25	0.30	0.26	0.33	0.16	0.31	0.27	0.22	0.25	0.17	0.26	0.23	0.48	0.43	0.44	0.31	0.48	0.51	0.54	0.55	0.42
Ireland	0.14	0.15	0.13	0.16	0.13	0.15	0.16	0.17	0.16	0.16	0.17	0.16	0.16	0.15	0.38	0.37	0.37	0.38	0.42	0.33	0.38
Iceland				0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00
Italy	1.05	1.02	1.44	1.35	1.10	1.21	1.26	1.41	1.27	1.26	1.12	1.70	2.21	2.33	2.41	2.37	2.40	2.67	2.55	2.63	2.58
Liechtenstein	0.78	0.65	1.05	1.49	0.60	1.61	1.09	0.90	0.82	0.94	1.58	1.64	1.95	1.18	1.07	0.99	1.16	1.18	1.28	1.18	1.14
Lithuania	0.06	0.08	0.16	0.09	0.06	0.10	0.11	0.08	0.08	0.05	0.16	0.11	0.15	0.10	0.12	0.08	0.15	0.13	0.18	0.18	0.12
Luxembourg	0.59	1.19	1.69	1.41	0.73	0.92	0.85	0.69	0.91	0.65	1.22	1.16	1.85	1.87	2.11	1.87	2.32	2.18	2.72	2.16	1.61
Latvia	0.06	0.08	0.09	0.05	0.04	0.07	0.08	0.06	0.06	0.04	0.12	0.07	0.10	0.06	0.05	0.05	0.12	0.10	0.12	0.12	0.09
North Macedonia	0.14	0.09	0.14	0.11	0.10	0.15	0.11	0.09	0.13	0.10	0.11	0.21	0.33	0.36	0.37	0.39	0.37	0.43	0.42	0.44	0.45
Malta	10.43	12.51	11.30	9.49	8.54	6.70	9.99	10.13	8.97	8.18	8.22	11.54	9.79	13.98	13.99	13.79	13.48	14.15	14.26	15.66	15.90
Montenegro	0.06	0.05	0.07	0.08	0.06	0.11	0.07	0.08	0.11	0.06	0.10	0.20	0.21	0.36	0.38	0.41	0.39	0.46	0.46	0.45	0.46
Netherlands	2.21	1.94	1.88	2.13	1.26	1.69	1.45	1.63	1.76	1.56	1.83	2.21	3.44	3.28	3.53	3.07	3.48	3.61	3.76	3.71	3.46
Norway	0.17	0.18	0.00	0.12	0.07	0.07	0.08	0.10	0.09	0.10	0.15	0.08	0.13	0.06	0.04	0.02	0.07	0.08	0.10	0.09	0.02
Romania	0.08	0.08	0.10	0.09	0.07	0.11	0.11	0.09	0.11	0.07	0.12	0.18	0.28	0.28	0.29	0.26	0.31	0.34	0.35	0.37	0.36
Serbia	0.11	0.11	0.10	0.16	0.09	0.22	0.18	0.15	0.20	0.12	0.21	0.33	0.59	0.63	0.73	0.69	0.75	0.82	0.89	0.95	0.91
Poland	0.20	0.27	0.35	0.24	0.18	0.30	0.31	0.21	0.24	0.20	0.49	0.34	0.58	0.45	0.63	0.49	0.64	0.66	0.80	0.74	0.66
Portugal	0.49	0.64	0.82	0.76	0.74	0.85	0.94	1.02	0.92	0.79	0.75	1.47	1.67	1.83	1.77	1.83	1.89	1.99	1.88	1.93	1.66
Sweden	0.24	0.18	0.21	0.13	0.09	0.09	0.11	0.09	0.09	0.07	0.17	0.10	0.14	0.08	0.05	0.03	0.12	0.09	0.08	0.12	0.07
Slovenia	0.22	0.18	0.20	0.30	0.15	0.24	0.24	0.20	0.18	0.22	0.30	0.21	0.43	0.39	0.44	0.37	0.48	0.55	0.52	0.52	0.46
Slovakia	0.22	0.27	0.37	0.20	0.14	0.25	0.20	0.15	0.17	0.10	0.22	0.21	0.41	0.39	0.36	0.26	0.40	0.47	0.50	0.47	0.40
Turkey	0.11	0.09	0.14	0.11	0.11	0.10	0.14	0.17	0.17	0.13	0.16	0.25	0.39	0.56	0.57	0.61	0.69	0.83	0.86	0.94	0.96
United Kingdom	1.00	1.04	0.82	1.13	0.82	0.91	1.03	1.01	0.88	0.85	0.80	0.88	1.05	1.05	1.28	1.14	1.21	1.17	1.18	1.09	1.04
EEA38_average	0.41	0.43	0.47	0.39	0.28	0.34	0.36	0.37	0.35	0.32	0.39	0.43	0.58	0.59	0.62	0.58	0.65	0.69	0.70	0.72	0.66

Centre thématique européen sur
Santé humaine et environnement
<https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-he>

Le Centre thématique européen sur la santé humaine et l'environnement (CTE-HE) est un consortium d'instituts européens sous contrat avec l'Agence européenne pour l'environnement.

