



Préparé pour Ministère de l'Environnement, du Climat et de la Biodiversité -
Direction des Ressources naturelles, de l'Eau et des Forêts

Préparée par:	Charlotte Wirion (WEO)	Révision:	V1.2
Client:	Nora Elvinger – Direction des Ressources naturelles, de l'Eau et des Forêts Observatoire de l'environnement naturel	Date d'émission:	18/10/2024
Référence:	mev_202308002	Statut:	Final



Table des matières

Introduction	3
Objectif de l'étude	3
La luminosité nocturne sur le territoire du Luxembourg.....	4
Impact de la lumière sur l'écosystème	9
Résultats	14
Inventaire de l'éclairage artificiel au Luxembourg	14
1) La luminosité par cellule de grille.....	18
2) La luminosité dans ou autour des zones protégées	19
3) La luminosité dans les 2 zones spécifiques de survol des oiseaux migrateur	20
4) La luminosité dans les zones riches en espèces de papillons de nuit	21
Identification des zones à enjeux et établissement d'une trame noire	22
Limitations de la méthode proposé	32
Conclusion	33



Introduction

Les zones noires, ou "trames noires", qui représentent un ensemble de réservoirs garantissant un niveau d'obscurité suffisante, offrent des avantages notables en favorisant la santé publique, en optimisant la consommation énergétique, en autorisant une expérience astronomique et en préservant la biodiversité.

Comprendre où la lumière nocturne peut être plus nocive pour la biodiversité et les espèces revêt une importance cruciale. Cette compréhension permet une planification plus avisée, assurant une protection adéquate tant pour les citoyens que pour la faune, tout en préservant l'équilibre naturel de ces environnements.

A noter que la présente étude se base sur les enseignements collectés lors de l'étude de faisabilité d'une trame noire, mandatée par l'Observatoire de l'environnement naturel, conformément au 3e Plan national concernant la protection de la nature.

Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude est de dresser un état des lieux concernant l'éclairage nocturne et les jeux de données associés au Luxembourg, tout en explorant des méthodes pour créer une "trame noire" sur le territoire en utilisant les données existantes.

Cette initiative vise à favoriser le maintien et la restauration de l'obscurité, en identifiant les zones de conflits nécessitant des solutions, en élaborant des plans d'actions, et en établissant un suivi et une évaluation. À travers cette démarche, l'étude a pour but d'approfondir la compréhension de l'éclairage nocturne et du patrimoine naturel nocturne.

Plus précisément, en utilisant les données disponibles, l'étude prévoit de :

- 1) Cartographier l'éclairage artificiel du pays sur les terrains publics et les propriétés privées en documentant auprès des acteurs cibles tels que les communes et les administrations étatiques, ainsi qu'en analysant des images satellites.
- 2) Sélectionner les espèces nocturnes cibles, déterminer les critères pour identifier les "hotspots" et recueillir d'autres données nécessaires à l'étude grâce à des échanges avec des experts.
- 3) Établir un état des lieux du patrimoine naturel nocturne du territoire afin d'identifier les zones à enjeux (hotspots).
- 4) Identifier d'éventuels conflits et impacts de l'éclairage nocturne sur la biodiversité.



- 5) Proposer les éléments nécessaires pour l'identification de la trame noire sur l'ensemble du territoire, définir les zones nécessitant une restauration de l'obscurité pour le bon fonctionnement de la biodiversité, et proposer des indicateurs pour suivre et évaluer l'évolution de l'éclairage nocturne et de la biodiversité nocturne sur le territoire.
- 6) Proposer des mesures correctives concrètes pour les divers cas de figure identifiés.

À terme, le réseau écologique résultant sera identifié en superposant les jeux de données collectées précédemment liés à l'éclairage nocturne et au patrimoine naturel. Une bonne articulation entre la trame noire et les autres trames déjà identifiées sur le territoire sera assurée.

La luminosité nocturne sur le territoire du Luxembourg

La question de l'éclairage est un compromis entre l'environnement, la sécurité et l'efficacité énergétique, tout en tenant compte de règlements européens en vigueur.

L'Accord de coalition du gouvernement actuel cite notamment sur la page 67 :

Pollution lumineuse

La pollution lumineuse ayant des répercussions négatives sur la santé et l'environnement, sa réduction sera poursuivie de manière conséquente. Le Gouvernement continuera à soutenir des projets exemplaires dans ce domaine et tiendra compte, dans la mesure du possible, des considérations y relatives lors de projets étatiques et renforcera les efforts de sensibilisation à l'adresse des différents acteurs publics et privés.

Au Luxembourg, il n'existe aucune obligation légale pour l'installation de systèmes d'éclairage sur les routes communales et étatiques. Cependant, lorsque de tels systèmes sont en place, ils doivent obligatoirement respecter la norme ILNAS-EN13201 ainsi que les critères de qualité qu'elle définit, sur l'ensemble du territoire du Grand-Duché. C'est pourquoi on la désigne sous le nom d'« ILNAS – Institut Luxembourgeois de Normalisation ». À l'inverse, nos pays voisins considèrent souvent cette norme comme une simple recommandation. Il est donc essentiel de souligner, voire d'accentuer, le fait que les valeurs indicatives de la norme industrielle EN 13201 entraînent souvent un sur-éclairage. De plus, cette norme ne spécifie aucune régulation quant aux valeurs maximales, et ne prend donc pas en compte les préoccupations environnementales.

Cette remarque est également valable pour les normes suivantes :

- DIN 67523, concernant l'éclairage des passages pour piétons (2010)
- EN 12464-2, portant sur l'éclairage des postes de travail en extérieur (2014)





- Les règlements ITM ET32.10 (1997) et CL 55.2 (1997)
- Le règlement SNSFP (1995)

Ces normes et règlements sont fondés sur les technologies de lampes à décharge et doivent être impérativement révisés afin de s'adapter à la technologie LED, largement déployée depuis les années 2010, ainsi qu'aux préoccupations environnementales actuelles.

En 2018, le Ministère du Développement Durable et des Infrastructures a publié un guide pratique pour un usage responsable de l'éclairage artificiel, intitulé « Leitfaden für gutes Licht im Aussenraum ». Ce guide recommande que la température de couleur des sources lumineuses artificielles à l'extérieur ne dépasse pas les 3 000 Kelvin, privilégiant ainsi une lumière chaude. Conformément à ce guide et à la brochure sur la « pollution lumineuse » publiée par l'Administration de la Nature et des Forêts, il est conseillé d'éviter l'ultraviolet et le bleu, des spectres que chaque être vivant, y compris les humains, devrait éviter en termes d'éclairage nocturne.

Plusieurs projets, dont certains sont actuellement en phase d'expérimentation dans différentes communes membres du Parc Naturel de l'Our, ont mis en place un système "Light on demand", où l'installation est asservie par des détecteurs de mouvement. Ce système permet d'allumer les luminaires uniquement lorsque cela est nécessaire, réduisant ainsi les heures de fonctionnement annuelles de 4200h à moins de 500h. Cela représente non seulement une économie d'énergie considérable, mais également un avantage significatif pour la faune et la flore, tant nocturnes que diurnes.

Pour favoriser le repos nocturne, 45 communes ont exprimé leur intérêt à participer à une action consistant à éteindre l'éclairage public pendant les heures creuses, de 1h à 4h30. Cependant, des problèmes politiques surgissent fréquemment, l'éclairage public étant souvent perçu comme indispensable pour des raisons de sécurité. À ce jour, 29 communes ont même abandonné le projet.

Le Luxembourg est de plus en plus confronté à un sur-éclairage inadapté dans le secteur privé, amplifié par l'effet rebond, par des coûts énergétiques encore trop bas et par des considérations de sécurité, d'esthétique ou de modernité. À long terme, il sera difficile de se passer d'un cadre légal spécifique encadrant les nuisances lumineuses.

En résumé, la gestion de l'éclairage public au Luxembourg présente des défis qui entremêlent des considérations techniques, budgétaires et politiques.

Dans le cadre de cette étude, nous examinons l'éclairage nocturne en utilisant des données satellites afin de comprendre l'intensité de l'illumination nocturne sur l'ensemble de la surface du Luxembourg. À cette fin, nous utilisons les données en source ouverte du radiomètre d'imagerie infrarouge visible (VIIRS), embarqué à bord des satellites Suomi-National Polar-orbiting Partnership (S-NPP) et Joint Polar Satellite System (JPSS). Le VIIRS fournit des mesures mondiales quotidiennes de la lumière visible nocturne et du proche infrarouge (NIR), adaptées à la science du système terrestre et aux études d'applications. La résolution spatiale de ces données est d'environ 750 mètres.

Pour améliorer la résolution de ces données, la technologie de WEO est employée. WEO utilise des techniques avancées de traitement d'image, notamment en exploitant les données provenant du satellite



Sentinel-2. Sentinel-2 fait partie du programme Copernicus de l'Agence spatiale européenne (ESA) et offre une capacité d'imagerie multispectrale à haute résolution spatiale.

Le satellite Sentinel-2 observe la Terre depuis l'espace avec une résolution spatiale allant jusqu'à 10 mètres, ce qui permet de capturer des détails précis de la surface terrestre. Il est équipé de bandes spectrales dans le domaine de la lumière visible et infrarouge avec une résolution spatiale de 10m. Ces caractéristiques font de Sentinel-2 un outil puissant pour la cartographie terrestre, la surveillance environnementale et, dans le cas de cette étude, l'amélioration de la résolution spatiale des données VIIRS.

En combinant les informations de Sentinel-2 avec des techniques avancées de traitement d'image basées sur l'apprentissage automatique et l'information visuelle RVB NIR, WEO parvient à augmenter la résolution spatiale des données VIIRS. Cette approche synergique offre une perspective plus détaillée de la luminosité nocturne au Luxembourg, permettant une analyse plus précise des modèles d'éclairage nocturne et de leurs variations. Ainsi, la combinaison de données provenant de différents satellites, tels que VIIRS et Sentinel-2, offre une approche complète pour étudier l'illumination nocturne à une échelle fine et détaillée.

Il est à noter que l'unité de mesure de la luminosité VIIRS est généralement exprimée en radiance, mesurée en watts par mètre carré par stéradian ($W/m^2/sr$). Cette mesure quantifie l'énergie émise dans différentes directions par unité de surface et d'angle solide. Cette unité permet d'évaluer la quantité de lumière visible émanant de la surface terrestre dans la plage de longueurs d'onde de 0.5 à 0.9 μm . Nous utilisons dans cette étude l'intensité lumineuse avec les unités en candela (cd/m^2).

La relation entre les watts (radiance), les lumens (mesure de flux lumineux,) et les candelas (intensité lumineuse) est comme suit:

$$1 W = 683 lm = 683 cd * sr$$

La luminosité VIIRS est exprimée en radiance et convertie en intensité lumineuse avec l'équation suivante¹:

$$1 nW/cm^2 * sr = 0.00683 cd/m^2$$

Cela donne des valeurs assez basses correspondant à l'éclairage naturel pendant la nuit. Par exemple, la pleine lune sur la surface de la Terre produit une luminance de seulement $0.0209 cd/m^2$. Cela indique que, en comparaison avec d'autres sources de lumière, la pleine lune émet une quantité relativement faible de lumière par unité de surface. La candela est une unité de mesure de l'intensité lumineuse dans une direction donnée, tandis que la luminance mesure la lumière émise par une source dans une direction spécifique par unité de surface vue dans cette direction. Ainsi, la luminance de $0.0209 cd/m^2$ mentionnée ici donne une idée de l'éclairement spécifique généré par la pleine lune sur la Terre.

¹ [Studie über Lichtemissionen in Luxemburg, März 2017](#)



Pour évaluer les cartes de luminosité nocturne créées par WEO à partir d'images satellites, nous comparons les résultats avec les données du cadastre lumineux du Sud (Enovos, Sudenergie) et les données Streetlighting (Klimaagence).

Le cadastre lumineux du Sud est élaboré par Eurosense au moyen de survols aériens qui capturent des images nocturnes en couleur (RVB), permettant ainsi la cartographie détaillée de l'éclairage. Ces images nocturnes sont traitées de manière similaire aux images aériennes diurnes et assemblées pour former une orthophotographie nocturne avec une résolution au sol d'environ 7,5 cm. Des mesures au sol ont été effectuées par Eurosense dans la zone du projet pour calibrer les images nocturnes, convertissant ainsi les valeurs de luminosité relatives en mesures absolues (cd/m^2). Ces mesures ont été réalisées à 21 points dans l'ensemble de la zone du projet, avec des mesures de distance effectuées à partir de sources lumineuses sélectionnées à chaque position. En utilisant ces données de mesure, les images aériennes sont calibrées, et Eurosense a généré des "cartes lumineuses" avec des valeurs de luminosité absolue en candela/m^2 . Étant exprimées dans les mêmes unités, la comparaison entre les données satellitaires et celles issues du survol aérien est facilitée.

Le tableau de calcul "Streetlighting" constitue un outil essentiel pour la numérisation de l'éclairage public et l'identification de la part des éclairages efficaces, notamment ceux utilisant la technologie LED. Dans le cadre du pacte climat, cet outil est largement adopté par les communes en vue de surveiller l'efficacité énergétique de l'éclairage public. Les données recueillies à travers cet outil comprennent des informations cruciales telles que le nombre de lampes par rue, leur puissance en watts, la consommation énergétique, ainsi que la proportion d'éclairages LED installés. Cette initiative offre ainsi aux municipalités une vision détaillée de la performance énergétique de leur infrastructure d'éclairage, facilitant la prise de décisions éclairées dans le contexte de la transition vers des sources lumineuses plus durables et écoénergétiques. Nous évaluons les données obtenues et comparons la quantité d'éclairage ainsi que la proportion d'éclairages LED par rapport à la luminosité quantifiée à l'aide des images satellites.

Tableau 1: Descriptions des données utilisées pour l'étude de la luminosité.

Produit	Type de donnée	Acquis de	Date	heure de survol
VIIRS	NOA VIIRS/NPP VNP46A1	Nasa DAAC	2021/01/01 – 2021/04/01	Vers minuit entre 00h40 – 1h30 ²
			2022/01/01 – 2022/04/01	Vers minuit entre 00h40 – 1h30
			2023/01/01 – 2023/04/01	Vers minuit entre 00h40 – 1h30
Sentinel-2	S2 MSIL2A bands 2,3,4,8 avec 10m résolution	Copernicus	2021/01/01 – 2021/04/01	Dans la matinée vers 10h30

² <https://www.ssec.wisc.edu/datacenter/npp/>



			2022/01/01 – 2022/04/01	Dans la matinée vers 10h30
			2023/01/01 – 2023/04/01	Dans la matinée vers 10h30
Cadastre lumineux du sud du Luxembourg	Orthophoto (RVB) de nuit avec une résolution spatiale de 7.5cm	Sudenergie S.A. Enovos Luxembourg S.A. sous condition de la convention signé	2022/02/12-13	Pendant la nuit
Streetlighting Klimaagence	Streetlighting tool qui contient de l'information sur l'illumination nocturne des communes engagé dans le pacte climat	Klimaagence avec le soutien des communes suivantes : Troisvierges, Mertert, Fischbach, Beckerich, Biwer, Ell, Junglinster, Schieren, Schuttrange, Stadtbredimus, Mersch	2018 - 2023	/

Les indicateurs pour quantifier la luminosité à long terme sont :

- 1) La luminosité nocturne dans une cellule de grille (1x1 km) pour identifier les zones les plus éclairées et les zones plus sombres à protéger.
- 2) La luminosité dans ou autour des zones protégées e.g. : Natura2000
- 3) La luminosité dans les 2 zones spécifiques de survol des oiseaux migrateurs
- 4) La luminosité dans des zones riches en espèces de papillons de nuit³ :
 - a. Charme, Forêt "Rouscht", coordonnées 73853E 93270N. Cette clairière de pins lumineuse, située en face de la réserve naturelle "Pëttener Bësch", est séparée de celle-ci par l'autoroute A7. C'est une zone extrêmement intéressante sur le Keuper, avec un caractère de prairie semi-sèche, par endroits même superficiellement très humide, abritant même la présence de gentianes à franges. Cependant, l'éclairage provenant de l'usine de créosote (parking et bâtiment) perturbe considérablement cet environnement.
 - b. Zone humide "Speckbrill" près de Lorentzweiler, 77287E 85777N où l'éclairage routier a un impact très négatif sur la faune nocturne.

³ Zones où des études/observations d'insectes nocturnes ont été effectuées à l'aide de techniques d'attraction lumineuse (Lichtfang).



- c. La "Schlammwiss" près d'Übersyren. En raison de la nature unique et sensible de cette zone humide, elle a été désignée comme site spécial de conservation en vertu de la directive européenne 79/409/CEE, également appelée « directive Oiseaux », et est l'une des 12 zones de protection des oiseaux du réseau Natura 2000 au Luxembourg. Grâce à ce statut, elle bénéficie de réglementations et de stratégies permettant la protection des oiseaux sauvages et de leurs habitats. Nous souhaitons comprendre l'influence du pont autoroutier sur cette zone afin d'évaluer son impact sur l'écosystème fragile de la région.
- 5) La luminosité dans des zones riches de papillons de nuit⁴ encore peu éclairées :
- a. "Falkebiert" près de Schlindermanderscheid, 71117E 111947N. Cette pente de schiste extrêmement sèche et chaude abrite plusieurs espèces de papillons de nuit très rares, constituant peut-être le seul aéroport pour certains d'entre eux au Luxembourg.
 - b. "Geichbësch – Fleerchers Säitert" entre Bissen et Vichten, 70329E 95542N. Il s'agit d'une clairière au milieu de la forêt avec une faune nocturne intéressante.

Impact de la lumière sur l'écosystème



Pour la création d'une "Trame Noire" nous explorons l'impact de la lumière sur les écosystèmes avec des experts de entre autres ANF, Parc Naturel de l'Our, MNHNL, LIST, Ecotop, natur & umwelt asbl et du secteur de l'éclairage public comme la Ville de Luxembourg et Ponts et Chaussées. Les discussions portent sur la collecte de données concernant les animaux et les insectes nocturnes, soulignant le manque de données mais aussi le potentiel de l'utilisation de la base de données ouverte du Musée national d'histoire naturelle. La liste des éléments discute de la collecte de données sur les mammifères, les insectes et les amphibiens, soulignant les effets des lumières artificielles sur les pollinisateurs. Pour les espèces terrestres des solutions qui ne nécessitent pas de "trame noire" peuvent être envisagées, comme par exemple des tunnels pour aider les animaux proches des terres à trouver des coins sombres, en particulier pour les grenouilles et les crapauds.

Pour les insectes, la topographie est mentionnée comme un facteur crucial, car les animaux sont attirés sur des kilomètres par des sources lumineuses. Chaque espèce réagit différemment à diverses sources lumineuses. Pour la Trame Noire, les dimensions envisageables dépendent donc de la topologie du terrain.

Un autre aspect sont les saisons qui sont identifiées comme cruciales pour certaines espèces, certaines nécessitant des vols nocturnes pendant une ou deux semaines, tandis que d'autres ont besoin d'une

⁴ Zones où des études/observations d'insectes nocturnes ont été effectuées à l'aide de techniques d'attraction lumineuse (Lichtfang).



saison entière. Et finalement, les heures juste après le coucher du soleil et juste avant le lever du soleil sont cruciales pour certaines espèces, telles que les chauves-souris.

Les espèces retenues pour représenter les espèces nocturnes au Luxembourg sont:

1) **Les oiseaux migrateurs** sont des espèces qui parcourent de longues distances entre leurs aires de reproduction et d'hivernage. La luminosité nocturne peut avoir des conséquences significatives sur les oiseaux migrateurs. Les lumières artificielles peuvent perturber leurs repères naturels et les désorienter pendant leurs migrations nocturnes. Cela peut entraîner des changements dans les schémas de repos, de recherche alimentaire, et même affecter la navigation aérienne. Cela peut avoir des répercussions sur leur santé, leur reproduction et la conservation des espèces dans leur ensemble. Les oiseaux migrateurs importants au Luxembourg et retenues pour cette étude sont:

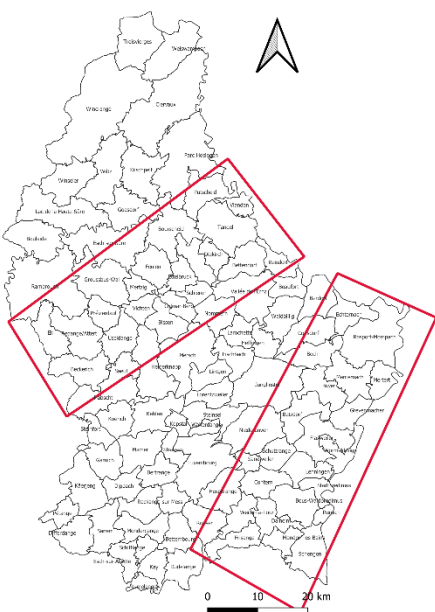


Figure 1: Routes principales des oiseaux migrateurs (natur & umwelt asbl)

- **La grue cendrée** (*Grus grus*): est un grand oiseau migrateur caractérisé par son plumage gris et son cou noir.
- **Les bécasses** (*Scolopacidae*): regroupent plusieurs espèces d'oiseaux de rivage, dont la bécasse des bois, la bécassine des marais, et d'autres.
- **Les merles** (*Turdidae*): comprenant des espèces comme le merle noir et la grive musicienne, sont des oiseaux chanteurs.
- **Les pouillots** (*Phylloscopidae*): tels que le pouillot véloce et le pouillot fitis, sont de petits oiseaux au plumage discret. Ils se nourrissent d'insectes et sont souvent associés à des habitats arboricoles.
- **Les phragmites** (*Acrocephalidae*) comme le phragmite des joncs, sont des oiseaux de marais avec un plumage discret. Ils se nourrissent d'insectes aquatiques et sont souvent présents dans des habitats de roseaux.
- **Les alouettes** (*Alaudidae*) comme l'alouette des champs, sont des oiseaux terrestres avec un plumage discret. Elles se nourrissent d'insectes et chantent souvent pendant leur vol

ascendant..

- **Les pipits** (*Motacillidae*), tels que le pipit des arbres et le pipit farlouse, sont de petits oiseaux au plumage terne.



- 2) **Le grand-duc** (*Bubo bubo*), aussi appelé "bubo" : Ces oiseaux de proie nocturnes sont connus pour leur envergure impressionnante et leur silhouette imposante. Ils sont répandus dans toute l'Europe, y compris au Luxembourg. Le grand-duc est un oiseau principalement nocturne, ce qui signifie qu'il est le plus actif pendant la nuit. Doté d'une vision exceptionnelle, il chasse habilement ses proies dans l'obscurité. La présence de ces chouettes majestueuses au Luxembourg est un témoignage de la diversité de la faune dans la région. Le grand-duc, en tant que prédateur nocturne, joue un rôle essentiel dans l'équilibre écologique, contribuant à réguler les populations d'animaux dont il se nourrit.

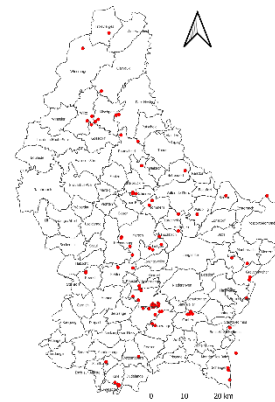


Figure 2: Observations du grand-duc en 2022 - 2023 (MNHN)

- 3) **Les chauves-souris** (Chiroptera) : Emblèmes nocturnes au Luxembourg, qui sont des mammifères volants essentiels à l'écosystème. Ces créatures nocturnes se réveillent lorsque le soleil se couche, se lançant dans la chasse aux insectes qui prospèrent pendant la nuit. Dotées d'une écholocation impressionnante, elles maintiennent les populations d'insectes sous contrôle, jouant un rôle crucial en tant qu'agents de régulation biologique. Ces chasses nocturnes les guident à travers divers habitats luxembourgeois, des forêts aux zones urbaines, contribuant ainsi à l'équilibre écologique régional. L'éclairage artificiel peut avoir un impact significatif sur les chauves-souris. Les chauves-souris sont adaptées à une vie dans l'obscurité et utilisent l'écholocation pour se déplacer et trouver leur proie. L'éclairage artificiel peut perturber leur comportement naturel et entraîner plusieurs problèmes :

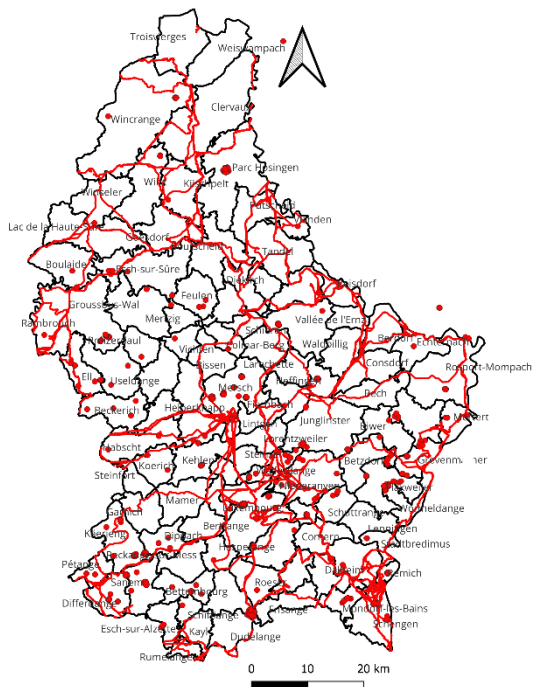


Figure 3: Observations des chauves-souris en 2022-2023 (MNHN) et trajectoires de vol modélisées en fonction de la distance-coût pour le murin à oreilles échancrées et le grand rhinolophe (Dietz, Bögelsack, Hillen, Pir, Artenschutzkonzept für die Große Hufeisennase in Luxemburg, 2012).

- Retarder ou empêcher la sortie des gîtes, entraînant une réduction du temps de chasse et manquant le pic d'abondance des insectes (juste après le crépuscule).
- Pousser les chauves-souris à modifier leur comportement alimentaire en les amenant à s'éloigner du gîte pour chasser dans des zones moins favorables.
- Affecter les itinéraires de déplacement et de chasse pour éviter les éclats de lumière artificielles dans les zones.

En conséquence les chauves-souris sont obligées d'utiliser des sites de chasse de moindre qualité et de perdre leur proie, attirée par les zones éclairées environnantes, un effet appelé « effet de vide ».



Certaines espèces légères, insectivores, migratrices et adaptées aux environnements exigus comme les espaces urbains, nécessitent une attention particulière, notamment le grand fer à cheval (1 colonie), le murin à oreilles échanquées (12 colonies), et le grand murin (10-12 colonies).

- 4) **Les papillons de nuit** (hétérocères) : Représentants fascinants des insectes nocturnes, ce sont des acteurs nocturnes captivants souvent méconnus par rapport à leurs homologues diurnes, jouant un rôle crucial dans l'écosystème. La vie nocturne des hétérocères met en lumière l'importance des insectes nocturnes en général. Ils contribuent à la pollinisation de plantes nocturnes et offrent une source de nourriture essentielle pour d'autres créatures, comme les chauves-souris. Les hétérocères sont également des indicateurs environnementaux sensibles, réagissant aux changements dans leur habitat et servant de baromètre pour la santé écologique. Les insectes nocturnes sont attirés par l'éclairage artificiel ce qui les expose au danger de prédation et d'épuisement.

Pour ces espèces, nous nous appuyons sur les données disponibles dans la base de données du MNHN, couvrant les années 2022 et 2023. Les données MNHN sont collectées par des citoyens au Luxembourg. De ce fait, elles comportent aussi un risque de biais d'observation. Pour chaque espèce par cellule de grille 1x1km², nous calculons ce biais et corrigeons les données selon l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \text{nombre d'observations corrigé} \\ &= \text{nombre d'observations pour espèce} \\ &\times \frac{\text{nombre total d'observations}}{\text{nombre d'observations pour toutes les espèces}} \end{aligned}$$

- Nombre d'observations pour l'espèce : Le nombre brut d'observations pour l'espèce cible par cellule de grille (1x1km).
- Nombre total d'observations : Le nombre total d'observations de toutes les espèces dans la zone étudiée par cellule de grille (1x1km).
- Nombre d'observations pour toutes les espèces : Cela fait référence à l'ensemble des observations enregistrées pour toutes les espèces par cellule de grille (1x1km), ce qui aide à contextualiser les données de l'espèce cible.

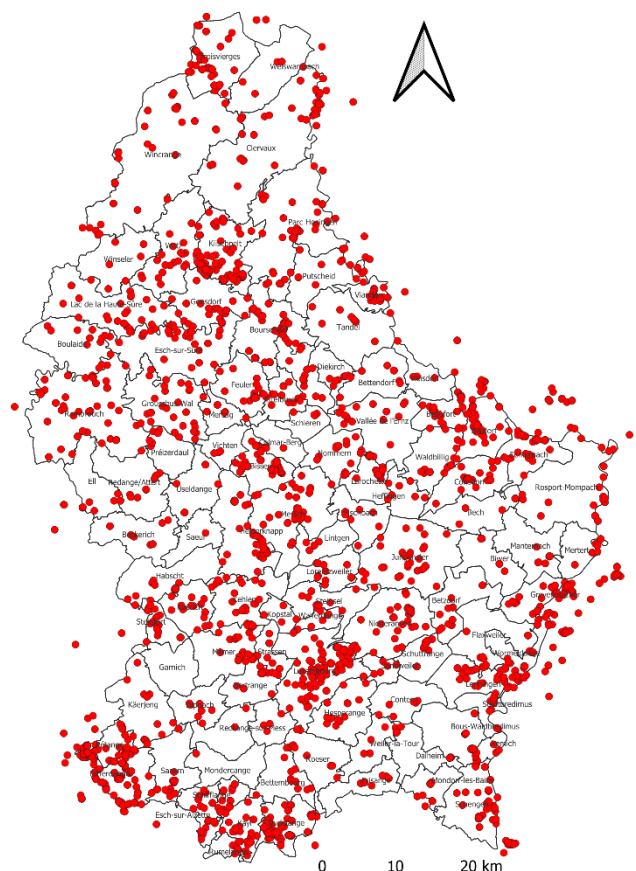


Figure 4: Observation des papillons de nuits entre 2022- 2023 (MNHN)



En plus nous ajoutons l'information des experts sur les routes principales des oiseaux migrateurs au Luxembourg (Figure 1) et les trajectoires de vol modélisées en fonction de la distance-coût pour le murin à oreilles échancrées et le grand rhinolophe (Figure 3), basées sur les emplacements de gîtes (Dietz, Bögelsack, Hillen, Pir : Artenschutzkonzept für die Große Hufeisennase in Luxemburg, 2012).

Les indicateurs que nous proposons pour faire le suivi à long terme des espèces nocturnes au Luxembourg et pour quantifier l'impact potentiel d'une trame noire sont :

- 1) La diversité des papillons de nuit/ chauves-souris et oiseaux dans une cellule de grille (1x1 km). Même si nous savons que la collecte n'a pas été systématique, cette analyse pourrait fournir des informations sur les zones où la diversité des espèces de papillons de nuit/chauves-souris est particulièrement élevée.
- 2) La répartition et l'abondance des espèces par intensité de la luminosité dans les cellules de grille (1x1km).
- 3) Les observations des espèces représentatives, de sorte que leur présence (corrigée pour bias d'observation) puisse être considérée comme représentative de nombreuses autres espèces et est corrélée avec les zones à fort impact de pollution lumineuse. Les espèces représentatives pour les papillons de nuit sont : le hibou ou fiancée (*Noctua pronuba*), le C-noir (*Xestia c-nigrum*), et la phalène ondée ou l'incertaine (*Xanthorhoe fluctuata*). Les papillons de nuit, très bons volants comme le hibou, peuvent se rendre à des sources de lumière situées à 2 km de distance. En revanche, la phalène ondée, moins bon voleur, est affectée par la lumière proche de son habitat. Les espèces représentatives pour les chauves-souris sont : le grand fer à cheval (*Rhinolophus ferrumequinum*), le murin à oreilles échancrées (*Myotis emarginatus*), et le grand murin (*Myotis myotis*). Les espèces représentatives pour les oiseaux migrateurs sont décrites dans le paragraphe antérieur.
- 4) La présence du grand-duc au Luxembourg dans la trame noire.



Résultats

Inventaire de l'éclairage artificiel au Luxembourg

Nous exploitons des données satellitaires pour quantifier l'éclairage au Luxembourg avec une résolution de 10m (Figure 7) et les confrontons à d'autres sources d'information pour évaluer nos résultats. Ces sources comprennent les données d'éclairage public provenant de l'outil Streetlighting, utilisé par 10 communes, les informations sur les communes s'engageant à éteindre l'éclairage entre 1h et 4h30 la nuit à partir de 2022, et les données RVB en haute résolution provenant du cadastre lumineux du Sud du Luxembourg.

Pour les données d'éclairage public Streetlighting, les communes fournissent des informations telles que l'éclairage en watts par longueur de rue en mètres et la proportion d'éclairage LED par rapport aux autres types. La plupart des données ont été mises à jour en 2022 ou antérieurement. Nous comparons ces données avec la luminosité en candéla par mètre carré que nous obtenons des images satellites de 2021 et 2022 par commune. Nous observons une corrélation de 81,7% entre l'éclairage public et la luminosité des images satellites, combinant les années 2021 et 2022. En ce qui concerne la proportion d'éclairage LED, nous constatons une corrélation négative avec la luminosité lorsque la proportion de LED augmente (-64%).

Pour les périodes de repos nocturne, où certaines communes éteignent l'éclairage entre 1h et 4h30, nous identifions cette réduction de luminosité pour les communes concernées avec les satellites. En 2022, une diminution de l'éclairage est observée en moyenne pour toutes les communes (Figure 5 en bleu). Cette réduction se poursuit pour les 19 communes qui implémentent le repos nocturne en 2022 (Figure 5 en orange) et les 10 communes qui le mettent en place début 2023 (Figure 5 en gris).

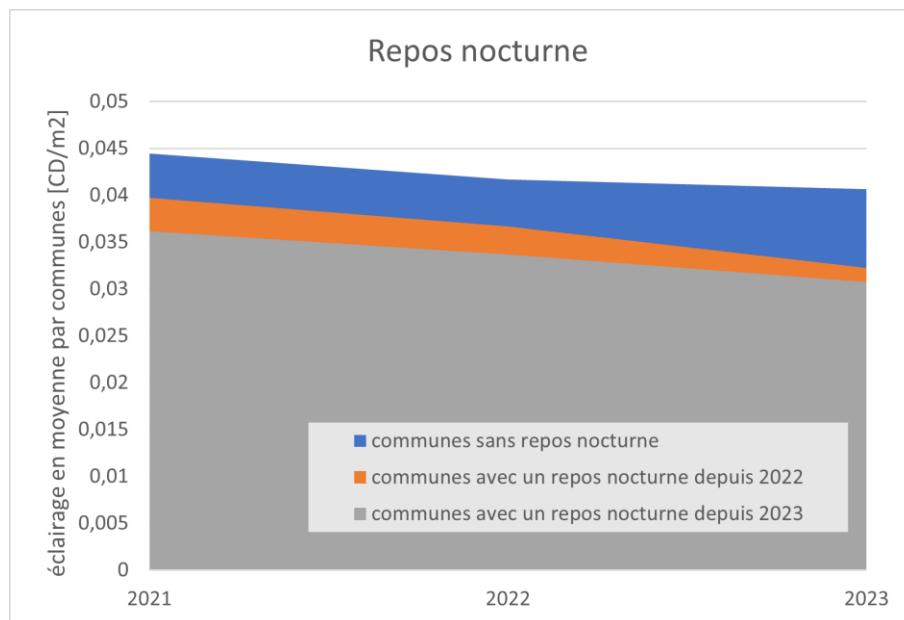


Figure 5: Réduction de l'éclairage pendant le repos nocturne pour 29 communes entre 2022 et début 2023.



Finalement, nous comparons la luminosité des images de satellite VIIRS avec les données du cadastre lumineux du Sud qui proviennent d'un survol aérien fournissant des données RVB à très haute résolution (7.5 cm). Nous agrégeons les données de haute résolution à la résolution de 10m pour faire la comparaison avec les données VIIRS dont nous avons augmenté la résolution à 10m. La technologie VIIRS démontre une remarquable capacité à représenter de manière fiable la luminosité des communes (Figure 6). Cela est clairement soutenu par le coefficient de détermination (R^2) de 0.94, obtenu lors de la comparaison avec le cadastre lumineux. Un R^2 élevé, proche de 1, indique que la variation de luminosité capturée par le VIIRS est fortement corrélée avec celle du cadastre lumineux, ce qui suggère une adéquation significative entre les deux ensembles de données.

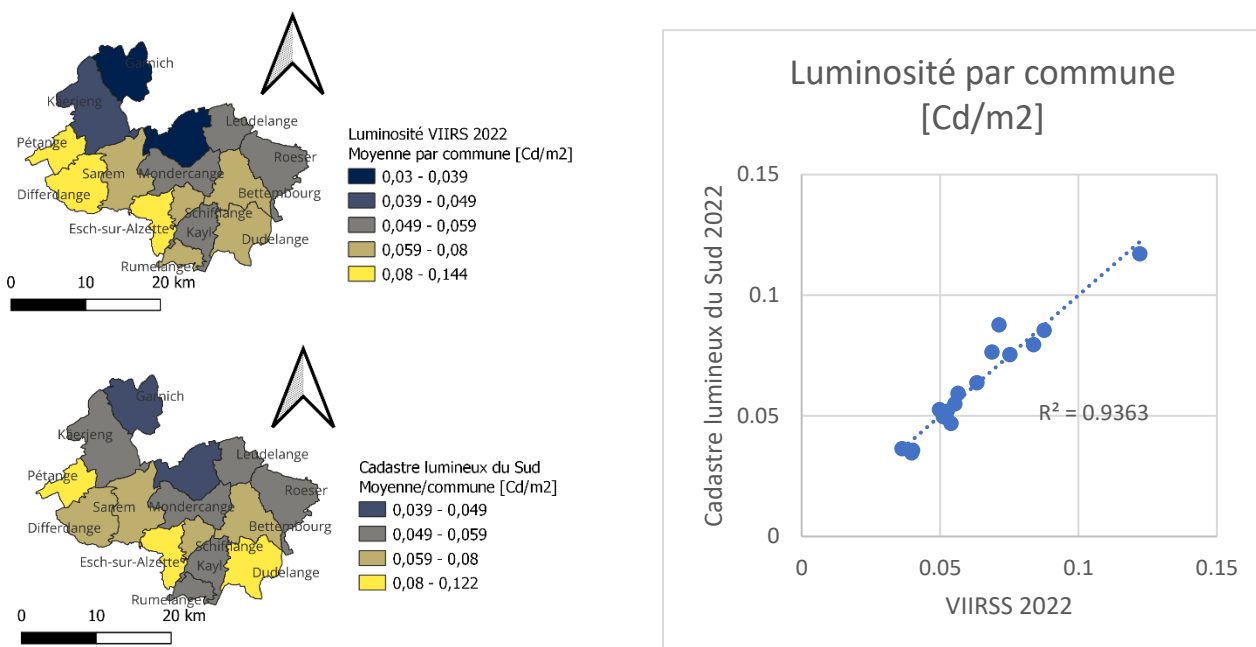


Figure 6: Comparaison de la luminosité par commune avec les données du cadastre lumineux du Sud et VIIRS en 2022.

Cette précision statistique, combinée aux corrélations avec les données d'éclairage public Streetlighting et le repos nocturne, renforce la fiabilité du VIIRS en tant qu'outil de représentation de la luminosité nocturne. Ces résultats prometteurs soutiennent l'approche de WEO dans l'évaluation de l'éclairage urbain et la surveillance de la luminosité nocturne avec les données satellitaires VIIRS, contribuant ainsi à l'élaboration d'une trame noire au Luxembourg.

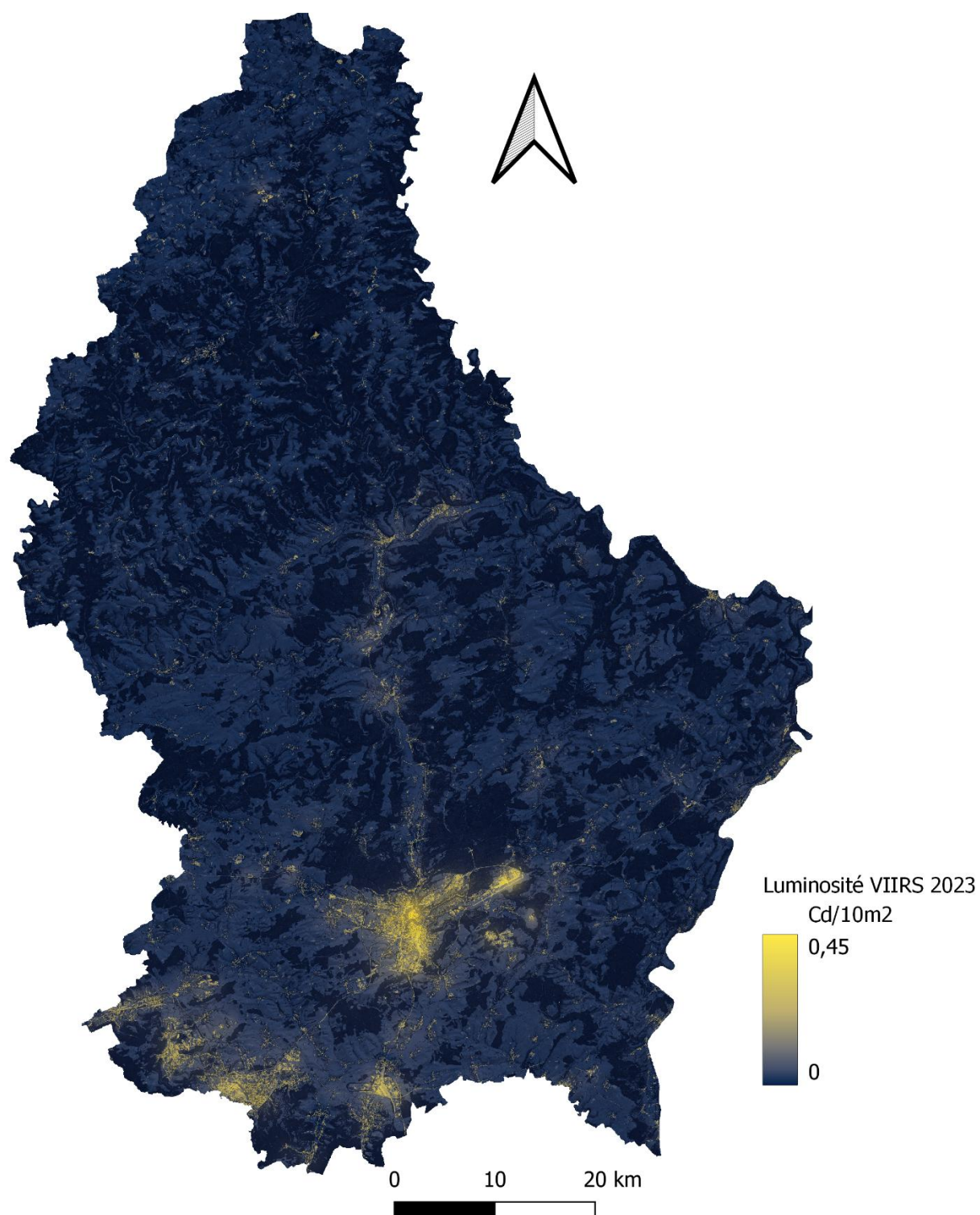


Figure 7: Luminosité nocturne en 2023 avec une résolution spatiale de 10m.

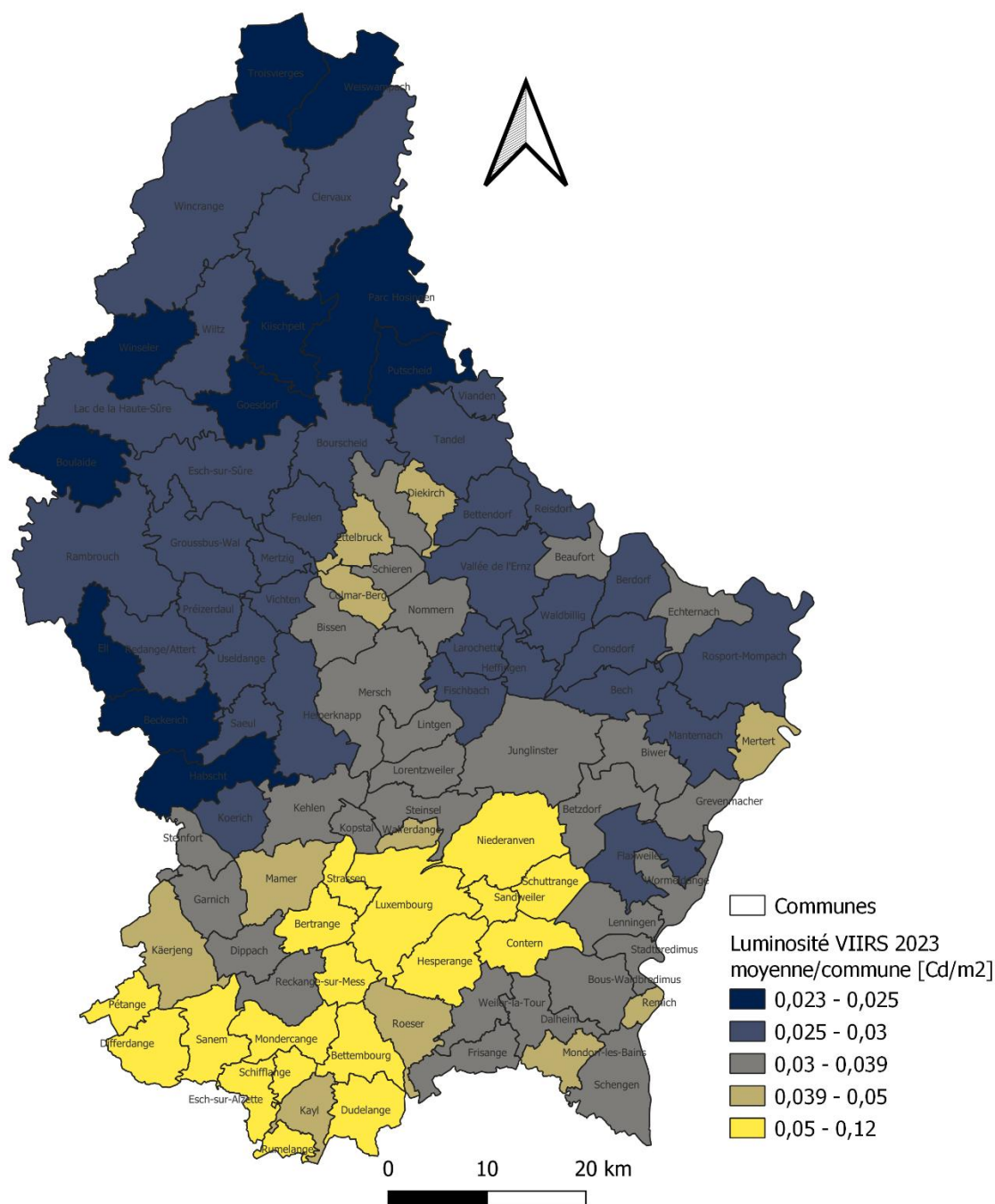


Figure 8: Luminosité en moyenne par commune [Cd/m²].



Nous proposons de faire le suivi de la luminosité nocturne moyennant des indicateurs pour évaluer la luminosité dans la trame noire. Nous définissons les zones plus éclairées comme celles ayant une luminosité dépassant 0.039 cd/m², la luminosité maximale moyenne dans les zones protégées.

1) La luminosité par cellule de grille

Afin de repérer les zones les plus éclairées et celles qui nécessitent une protection, nous évaluons la luminosité nocturne par cellule de grille (1x1 km).

En 2021, 16% des grilles 1x1 km sont ainsi identifiées comme zones plus éclairées, comparativement à 12% en 2022 et 10% en 2023. Ces pourcentages reflètent la variation de la luminosité nocturne au fil des années, fournissant des indications importantes pour la conservation des zones sensibles à la lumière.

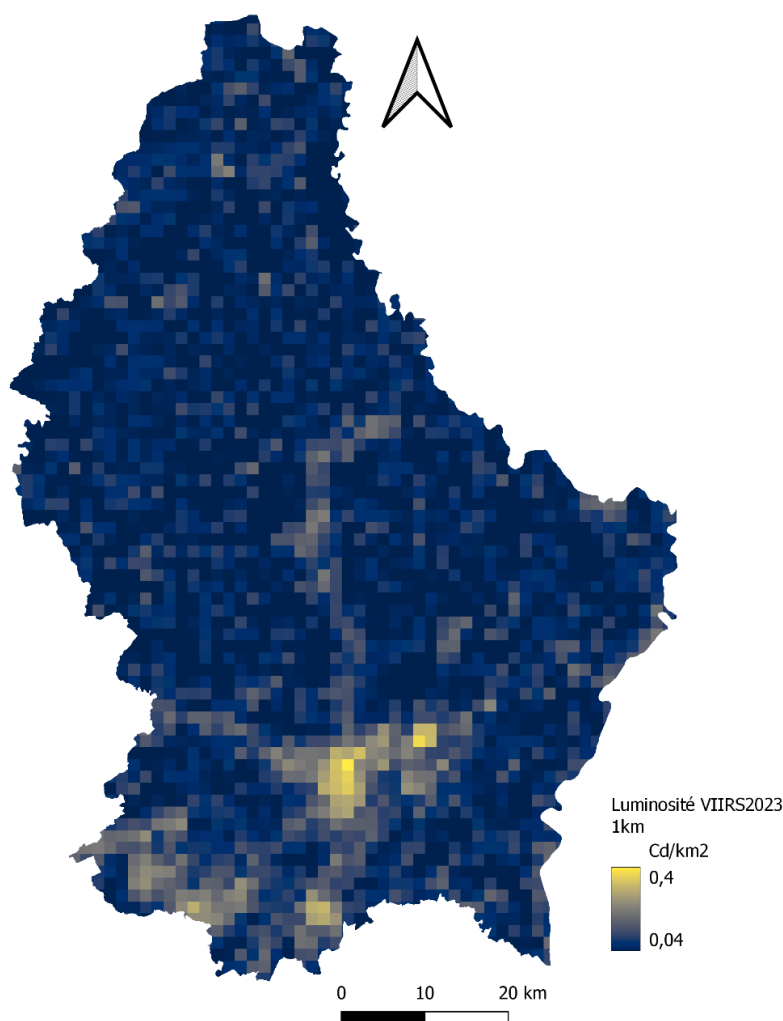


Figure 9: La luminosité nocturne dans une cellule de grille de 1x1 km pour identifier les zones les plus éclairées et les plus sombres en 2023.



2) La luminosité dans ou autour des zones protégées

La luminosité dans les zones protégées s'échelonne entre 0.02 Cd/m² pour les zones les plus obscures au Nord et 0.081Cd/m² pour les zones protégées les plus éclairées au Sud du Luxembourg. En incluant une zone de 100m autour des frontières, nous constatons une augmentation de la luminosité d'environ 0.02Cd/m² autour de certaines zones protégées, par exemple la Vallée supérieure de l'Alzette, la Vallée de la Syre de Moutfort à Roodt/Syre ou Dudelange Haard mais aussi Am Pudel, Roeserbann et Brill. En moyenne les zones protégées ont une luminosité de 0.035 Cd/m² en 2023 ce qui représente une légère diminution de la luminosité depuis 2021 (luminosité= 0.037 Cd/m²).

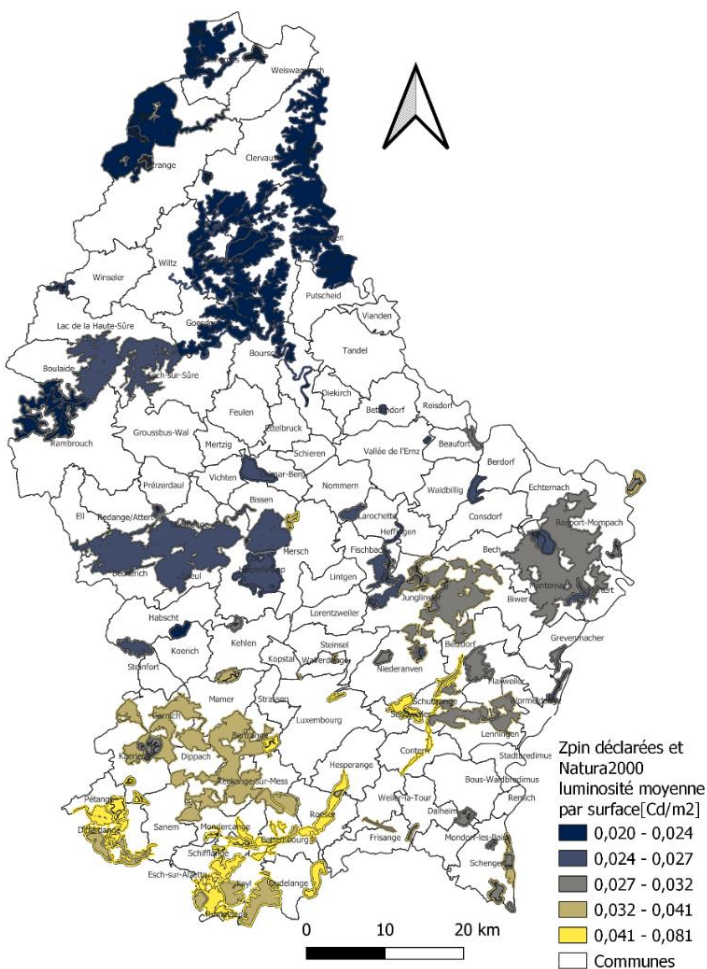


Figure 11: Luminosité moyenne dans et 100m autour des zones protégées.

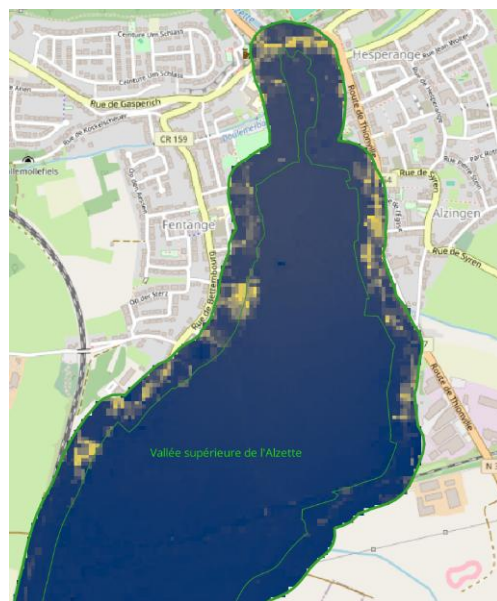


Figure 10: Luminosité au Nord de la vallée supérieure de l'Alzette. Illustration de la luminosité provenant des routes et des villages autour des zones protégées.



3) La luminosité dans les 2 zones spécifiques de survol des oiseaux migrateurs

Dans les zones de survol des oiseaux migrateurs, nous observons une stabilité de la luminosité moyenne entre 2021 et 2023. La luminosité moyenne dans la zone Nord reste constante, avec une valeur moyenne de 0.028, tandis que dans la zone Sud, elle reste également stable à 0.035. Cependant, en examinant les valeurs maximales de luminosité dans les deux zones, nous constatons une diminution entre 2021 et 2023.

En 2021, la luminosité maximale dans la zone Nord était de 0.56 Cd/m², mais en 2023, elle a chuté à 0.29 Cd/m². De même, dans la zone Sud, la luminosité maximale était de 0.69 Cd/m² en 2021, mais en 2023, elle a diminué à 0.43 Cd/m². Ces résultats indiquent une tendance à la baisse de la luminosité maximale au fil du temps dans les deux zones, suggérant des changements potentiels dans l'environnement lumineux au cours de cette période.

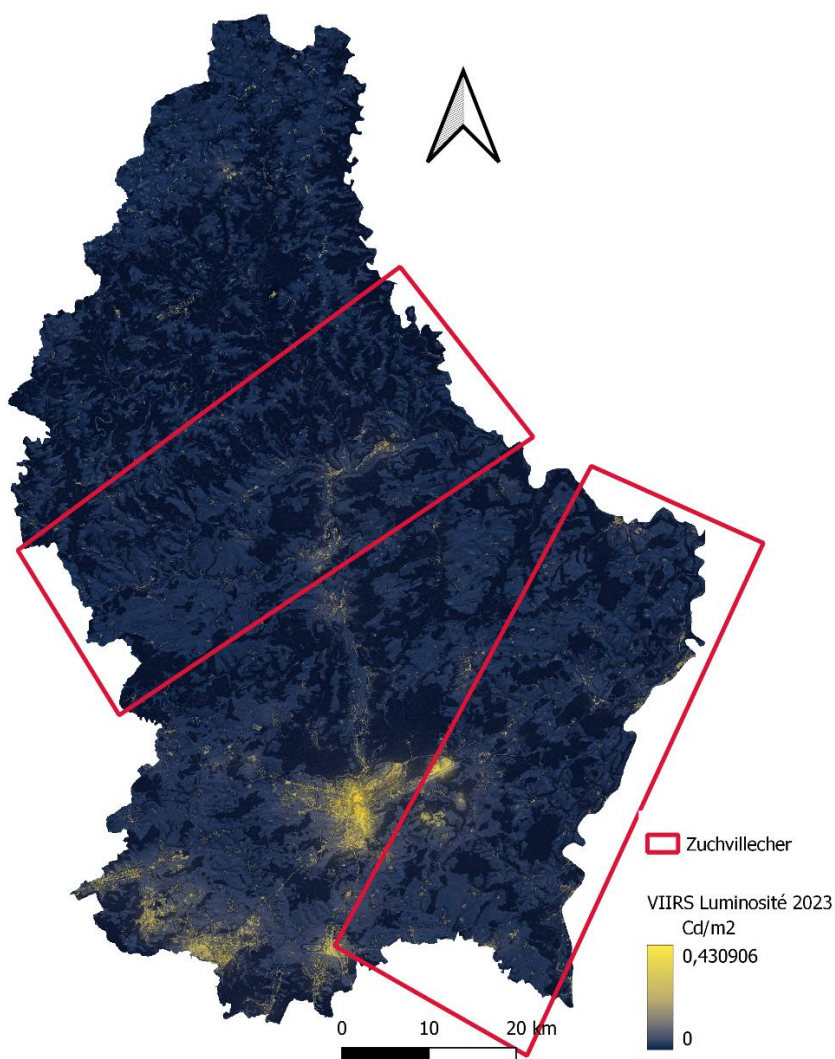


Figure 12: Luminosité dans les zones de survol des oiseaux migrateurs.



4) La luminosité dans les zones riches en espèces de papillons de nuit

Les experts ont repéré des zones riches en espèces de papillons de nuit nécessitant un suivi attentif de la luminosité. Parmi celles-ci, trois zones sont particulièrement préoccupantes en raison de sources lumineuses potentiellement néfastes pour la faune nocturne. En contrepartie, deux zones remarquables ont jusqu'à présent échappé à l'impact de la pollution lumineuse.

L'utilisation des données VIIRS permet de mettre en évidence ces variations de luminosité nocturne, avec les zones préservant l'obscurité demeurant en dessous du seuil critique de 0.039 Cd/m², identifié comme la moyenne maximale dans les zones protégées. Dans les zones éclairées, une augmentation de luminosité a été constatée depuis 2021 dans la zone humide de « Speckbrill », tandis que la « Schlammwiss » a enregistré une diminution depuis la même période. Pour la forêt de « Rouscht », l'influence des sources lumineuses environnantes semble avoir un impact limité sur le repos nocturne, avec une luminosité demeurant proche du seuil de 0.039 Cd/m².

En conclusion, l'analyse des données VIIRS révèle des disparités marquées dans la luminosité nocturne de différentes zones, soulignant l'importance de surveiller et de gérer les sources lumineuses afin de préserver l'équilibre des écosystèmes nocturnes.

Tableau 2: Suivi de la luminosité dans les zones riches en espèces de papillons de nuit identifiée par les experts

Zones riches en espèces de papillons de nuit	Zones éclairées identifiées par l'expert	Luminosité VIIRS 2021 [Cd/m ²]	Luminosité VIIRS 2022 [Cd/m ²]	Luminosité VIIRS 2023 [Cd/m ²]
Charme, Forêt "Rouscht"	Oui, influence de l'installation Creos et autoroute A7	0.029	0.042	0.037
Zone humide "Speckbrill"	Oui, influence du Viaduc de Lorentzweiler	0.071	0.085	0.127
La "Schlammwiss" près d'Übersyren	Oui, influence d'un pont autoroutier A1	0.101	0.056	0.036
"Falkebiert" près de Schlindermanscheid	Non	0.028	0.025	0.026
"Geichbësch – Fleechers Säitert" entre Bissen et Vichten	Non	0.029	0.030	0.029



Identification des zones à enjeux et établissement d'une trame noire

Pour cibler les zones à fort enjeu de biodiversité, nous évaluons le nombre (avec correction du biais) de papillons de nuit, de chauves-souris et d'oiseaux dans chaque cellule de grille (1x1 km). Nous identifions ainsi les « hotspots » de biodiversité. Ces « hotspots » de biodiversité devraient être intégrés dans la trame noire, et pour ceux dépassant le seuil de luminosité de 0.039 Cd/m², il est suggéré de rétablir l'obscurité afin de protéger la faune nocturne.

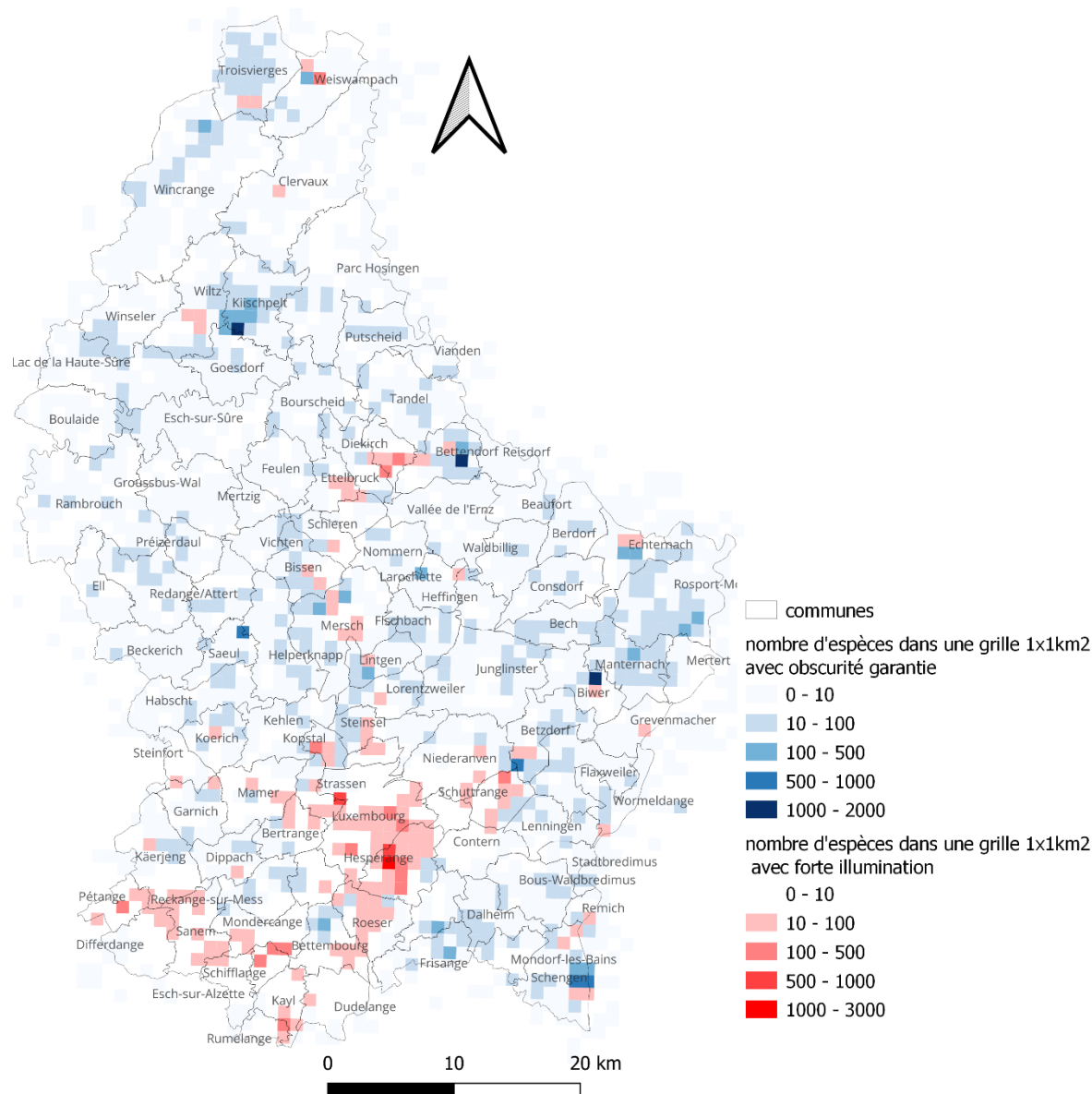


Figure 13: Identification des zones à enjeux du patrimoine naturel nocturne du territoire sur une grille 1x1km incluant les papillons de nuit, les chauves-souris, les oiseaux migrateurs et le grand-duc par intensité de la luminosité (en rouge > 0.039 cd/km², en bleu < 0.039 Cd/km²).



La Figure 13 met en évidence les « hotspots » de biodiversité pour les espèces représentatives (telles qu'indiquées à la page 13), incluant les papillons de nuit, les chauves-souris, les oiseaux migrateurs et le grand-duc, à travers tout le territoire luxembourgeois.

L'analyse de la luminosité dans les zones où les espèces représentatives sont présentes révèle une légère diminution entre 2021 et 2023 tant de la luminosité maximale que moyenne dans les grilles de 1x1 km où ces espèces ont été repérées. Malheureusement, des valeurs de luminosité très élevées persistent, atteignant un maximum d'environ 0.3 Cd/m², dépassant nettement le seuil maximal fixé à 0.039 Cd/m². Toutefois, en moyenne, les emplacements identifiés demeurent en dessous de ce seuil (voir Figure 14, Figure 15, et Figure 16), suggérant que, pour la majorité des localisations recensées, l'impact de la luminosité reste acceptable. Toutes les grilles 1x1km avec des espèces représentatives sont retenues dans la trame noire même si elles dépassent la luminosité de 0.039 Cd/m², soulignant la nécessité de considérer un rétablissement de l'obscurité pour ces zones.

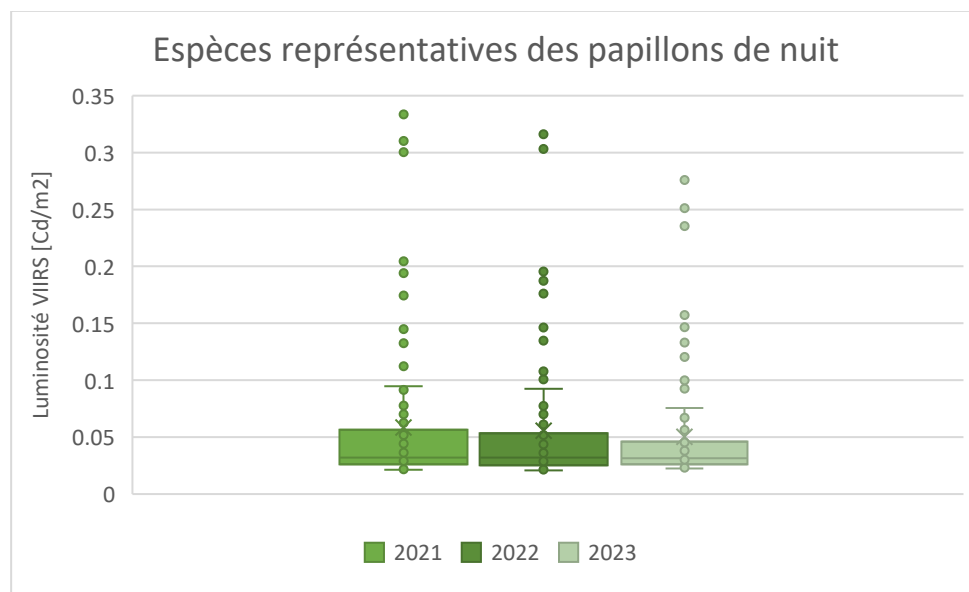


Figure 14: Luminosité VIIRS pour les grilles 1x1km avec présence des espèces représentatives des papillons de nuit : le hibou ou fiancée (*Noctua pronuba*), le C-noir (*Xestia c-nigrum*), et la phalène ondée ou l'incertaine (*Xanthorhoe fluctuata*).

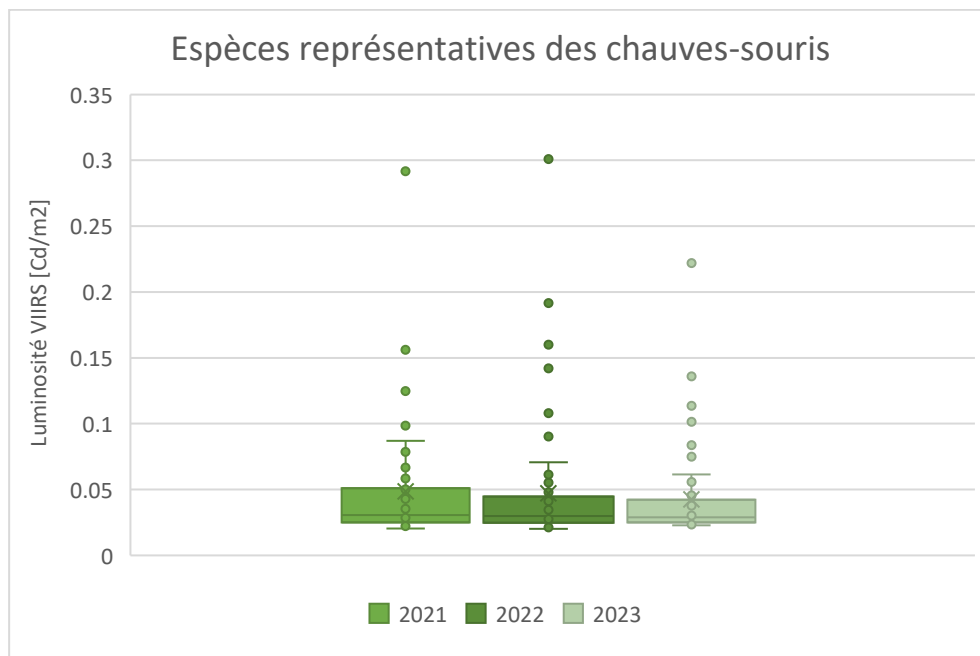


Figure 15: Luminosité VIIRS pour les grilles 1x1km avec présence des espèces représentatives des chauves-souris : le grand fer à cheval (*Rhinolophus ferrumequinum*), le murin à oreilles échancrées (*Myotis emarginatus*), et le grand murin (*Myotis myotis*).

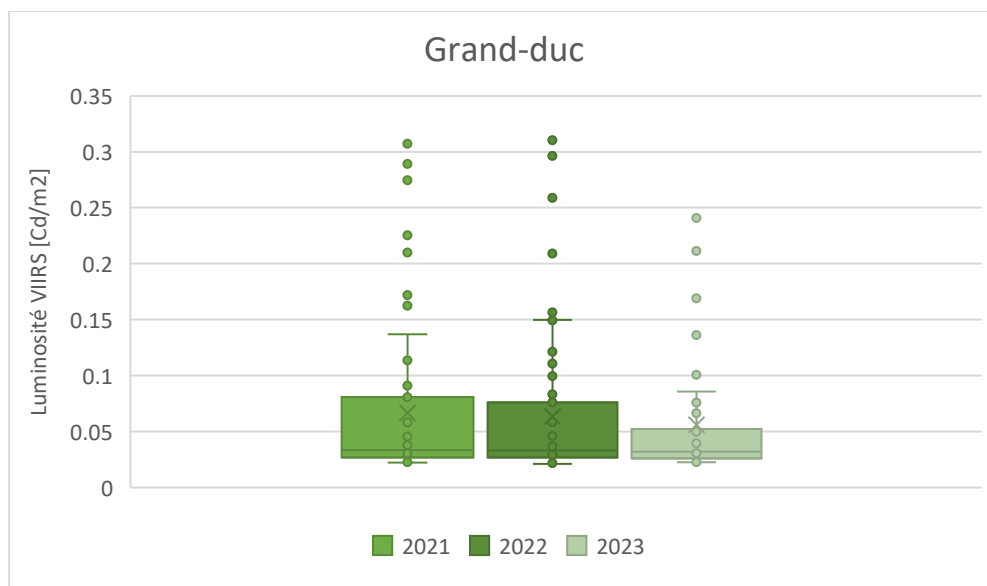


Figure 16: Luminosité VIIRS pour les grilles 1x1km avec présence du grand-duc

Pour établir une trame noire destinée à la protection de la faune nocturne, nous combinons des données existantes telles que les corridors de la faune sauvage, les cours d'eau et les zones protégées. Simultanément, nous intégrons de nouvelles données générées au cours de l'étude, telles que la luminosité nocturne, ainsi que les 'hotspots' de biodiversité de la faune nocturne (Tableau 3).



Tableau 3: Descriptions des données utilisées pour l'établissement de la trame noire.

Produit	Type de donnée	Acquis de	Date	Résolution
Connectivité écologique	1) Couche des corridors faune sauvage mise à disposition par l'ANF. 2) Couche des corridors aquatiques	Geoportail.lu	Mise à jour continue. Date d'utilisation 02/2024	1) 500m 2) 50m avec tampon 500m
Zones protégées	1) Zones protégées d'intérêt national (ZPIN) 2) Natura 2000	Geoportail.lu	1) Mise à jour : 2020 2) Mise à jour : 17/11/2009	Vecteur
Trajectoires de vol modélisées pour la chauve-souris	Modélisation en fonction de la distance-coût pour le murin à oreilles échancrées et le grand rhinolophe, basée sur les emplacements de gîtes (<i>Artenschutzkonzept für die Große Hufeisennase in Luxemburg, 2012</i>).	Institut für Tierökologie und Naturbildung GmbH	02/2012	10m avec tampon de 50m
Zones à enjeux	Nombre d'espèces de référence (biais corrigé) par intensité de la luminosité (Figure 13)	MNHNL	2022-2023	Grille 1x1km
Luminosité	VIIRS [cd/m ²] (Figure 7)	WEO	2023	10m

Nous initions la trame noire le long des corridors de la faune sauvage, des trajectoires de vol modélisées en fonction de la distance-coût pour la chauve-souris, des cours d'eau, ainsi que dans les zones protégées (Natura 2000 ou ZPIN). De plus, une pondération plus forte est appliquée aux zones ayant une biodiversité significative (≥ 5 espèce/km²), reflétant leur importance pour la conservation nocturne (bleu foncé, Figure 19).

En revanche, si la luminosité est élevée (> 0.039 Cd/m²) soit localement, soit dans un rayon de 1km, les zones sont déclarées comme non adaptées. Toutefois, certaines zones même sous forte luminosité, sont conservées bien que non appropriées mais indispensables pour la faune nocturne s'il y a présence la présence d'espèces nocturnes (>5 espèces/km²) (jaune - vert clair, Figure 19 et Figure 20).

Les zones identifiées comme adéquates et importantes pour la biodiversité soulignent l'importance de préserver l'obscurité pour le bien-être des espèces nocturnes. Les zones identifiées comme bien adaptées peuvent ne pas être fortement fréquentées par les espèces sélectionnées pour cette étude, il reste qu'elles représentent des refuges potentiels, créant une zone tampon favorable à la biodiversité nocturne.

La Figure 19 montre que, dans ces zones bien adaptées, des nuisances lumineuses provenant de villages ou d'autres infrastructures sont fréquentes. Il est donc pertinent de discuter de ces zones qui sont cruciales pour les espèces nocturnes, mais qui souffrent d'un excès de luminosité (Figure 20):

1) La ville de Luxembourg et les communes environnantes :

En raison de la forte luminosité dans cette région, nous proposons d'établir une trame noire où l'éclairage nocturne sera limité. Les zones choisies pour la trame noire incluent les espaces bleus et verts suivants (Figure 17) :

- La rive de l'Alzette et de la Pétrusse
- Le long de la Huerbaach, Zéissengerbaach
- Le parc municipal Edouard André, Niedergrünwald et Dräi Eechelen
- Le long de Neudorf-Weimershof
- Le long de la voie ferrée en direction Cents-Hamm
- A travers les forêts Bambësch, Enneschte Bësch, Hesperange, Leudelange, Walferdange, Sandweiler et Luxembourg-Hamm
- Le long de la piste cyclable du Centre et l'Autoroute d'Arlon

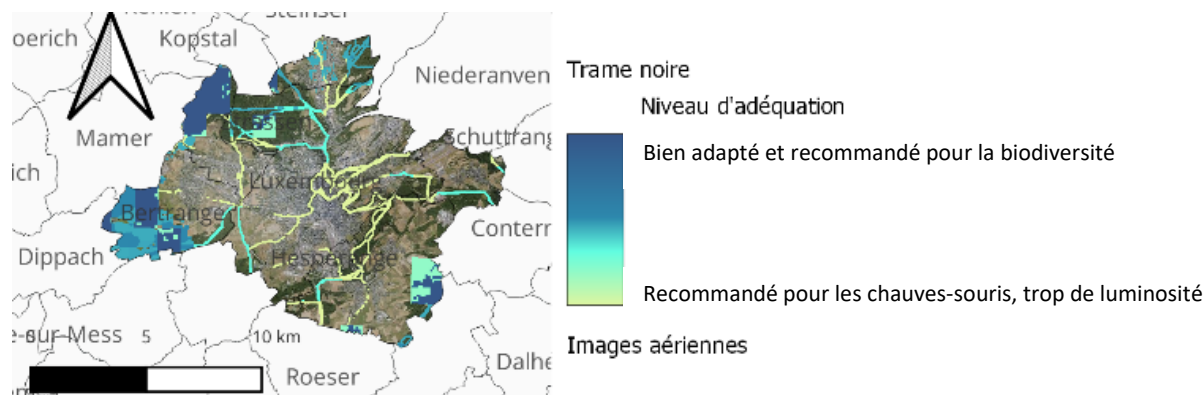


Figure 17: Proposition de l'établissement d'une Trame Noire dans la ville de Luxembourg et les communes qui l'entourent

2) Les communes du Sud du Luxembourg

Le sud du Luxembourg, fortement urbanisé, présente également une forte illumination nocturne. Pour améliorer le bien-être de la faune nocturne dans cette région, nous proposons l'établissement d'une trame noire le long des axes suivants (Figure 18) :

- Les cours d'eau Chiers, Alzette, Mess, Kiemelbaach, Mierbaach, Kaelbaach, et Diddelengerbaach
- Les forêts de Dudelange, Kayl, Rumelange et Esch-sur-Alzette, Gaalgebierg, Sanem, Differdange et Pétange

Dans cette région, les (anciens) sites industriels peuvent également contribuer à la réduction de l'éclairage nocturne en instaurant des périodes de repos de l'illumination :



- Zone Industrielle Hahneboesch
- Ellergronn
- Cimalux

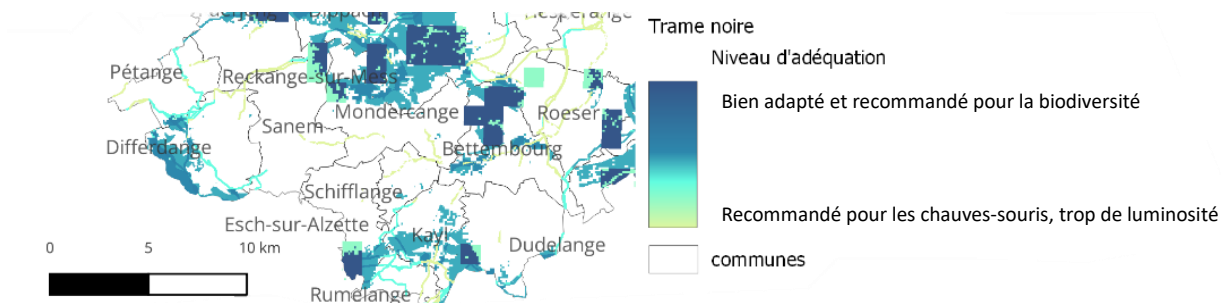


Figure 18: Proposition de l'établissement d'une Trame Noire dans les communes au Sud du Luxembourg

3) La région des vignes

Dans cette région, il serait avantageux d'établir une trame noire le long des cours d'eau, où l'éclairage nocturne est particulièrement élevé. Voici les zones spécifiques à prioriser pour offrir un répit aux espèces nocturnes :

- Le long des cours d'eau : Aalbaach, Schlebaach, Gouschtengerbaach, Rouderbaach et la Moselle.
- Les forêts de Grevenmacher, Wormeldange
- Les vignes autour de Schengen, Bech-Kleinmacher, Wormeldange, Op der Schleef, Wousselt
- La commune de Stadtbredimus, Besch-Kleinmacher ainsi que certains quartiers de Remich

4) Mersch et ses environs

Dans cette région, en particulier le long de l'axe de l'Alzette, il est essentiel de réduire la luminosité nocturne, non seulement pour protéger les écosystèmes, mais aussi pour atténuer l'impact des fermes et des infrastructures agricoles souvent illuminées. Voici quelques spécifications concernant les zones prioritaires :

- Le long des cours d'eau: Alzette, Kaasselterbach, Mamer, Eisch, Attert, Rouschtbaach, Wark et Sauer.
- Les forêts Pettenbësch, Quangebiersch.
- Les communes Erpeldange-sur-Sûre, Schrandweiler.
- Le site de ArcelorMittal Bissen, l'usine de Goodyear à Colmar-Berg et le Reitstall um Rouscht.



5) Le Nord du Luxembourg

En général, le Nord du Luxembourg est mieux protégé de la pollution lumineuse en raison de son caractère plus rural et forestier. Cependant, il subsiste certaines zones où la réduction de la luminosité nocturne serait bénéfique :

- Les petites communes et villages qui bordent les forêts comme celles de Parc Hosingen, Clervaux, Wincrange, et Wiltz.
- Les sites proches de cours d'eau tels que la Sûre, la Clerve, la Woltz, Helzenerbaach, Trëtterbaach, Huechterbaach.
- Les zones industrielles de Hosingen et de Wiltz.

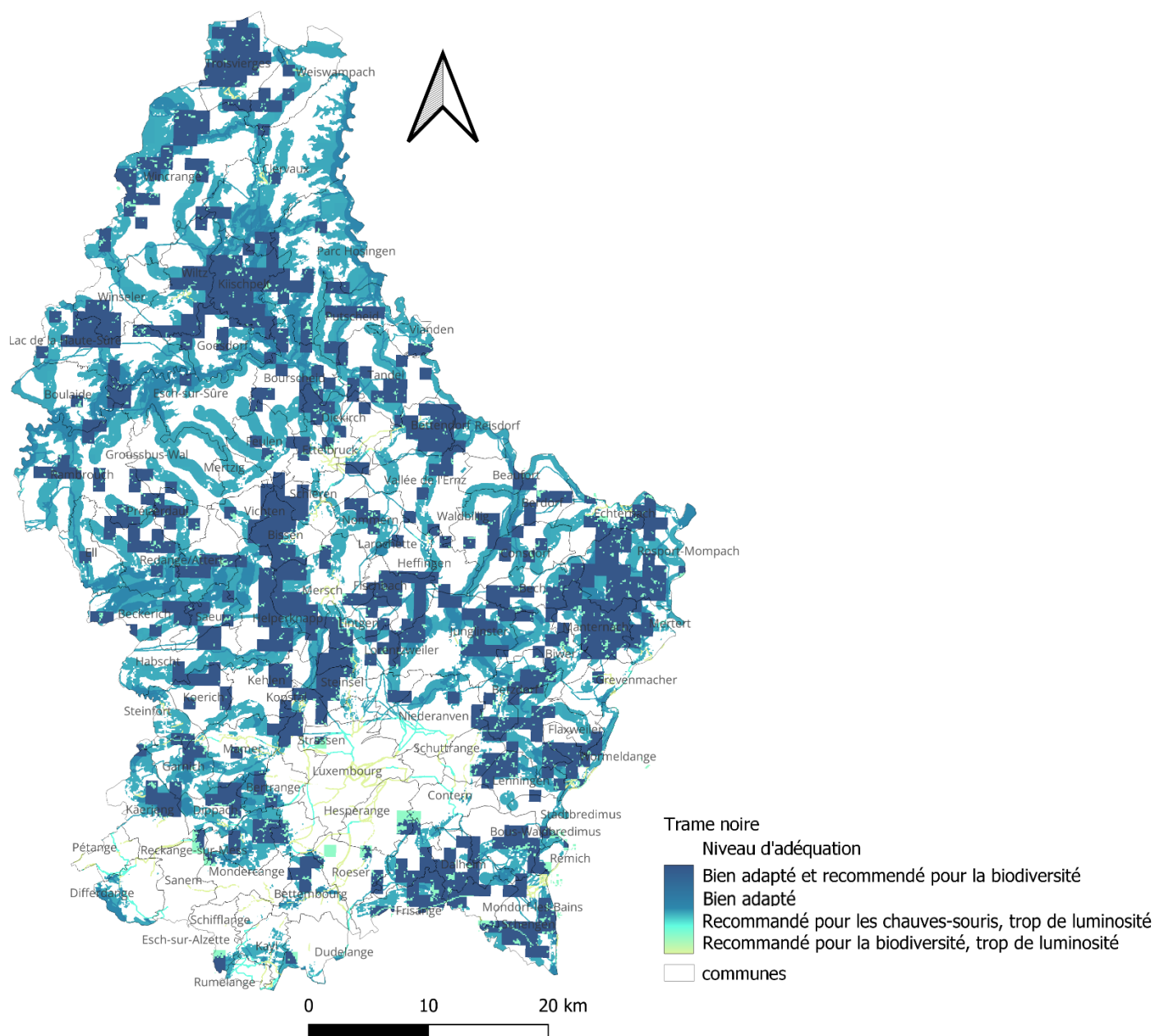


Figure 19: Trame noire indiquant le niveau d'adéquation des zones proposées : les zones bleu et bleu foncé sont les zones importantes pour la biodiversité et qui ont une luminosité adaptée, les zones turquoise sont des corridors naturels avec une luminosité adaptée mais pas spécifiquement recommandée pour les espèces nocturnes et les zones vert clair sont des zones recommandées pour les espèces nocturnes nécessitant un rétablissement de l'obscurité pour ces zones.

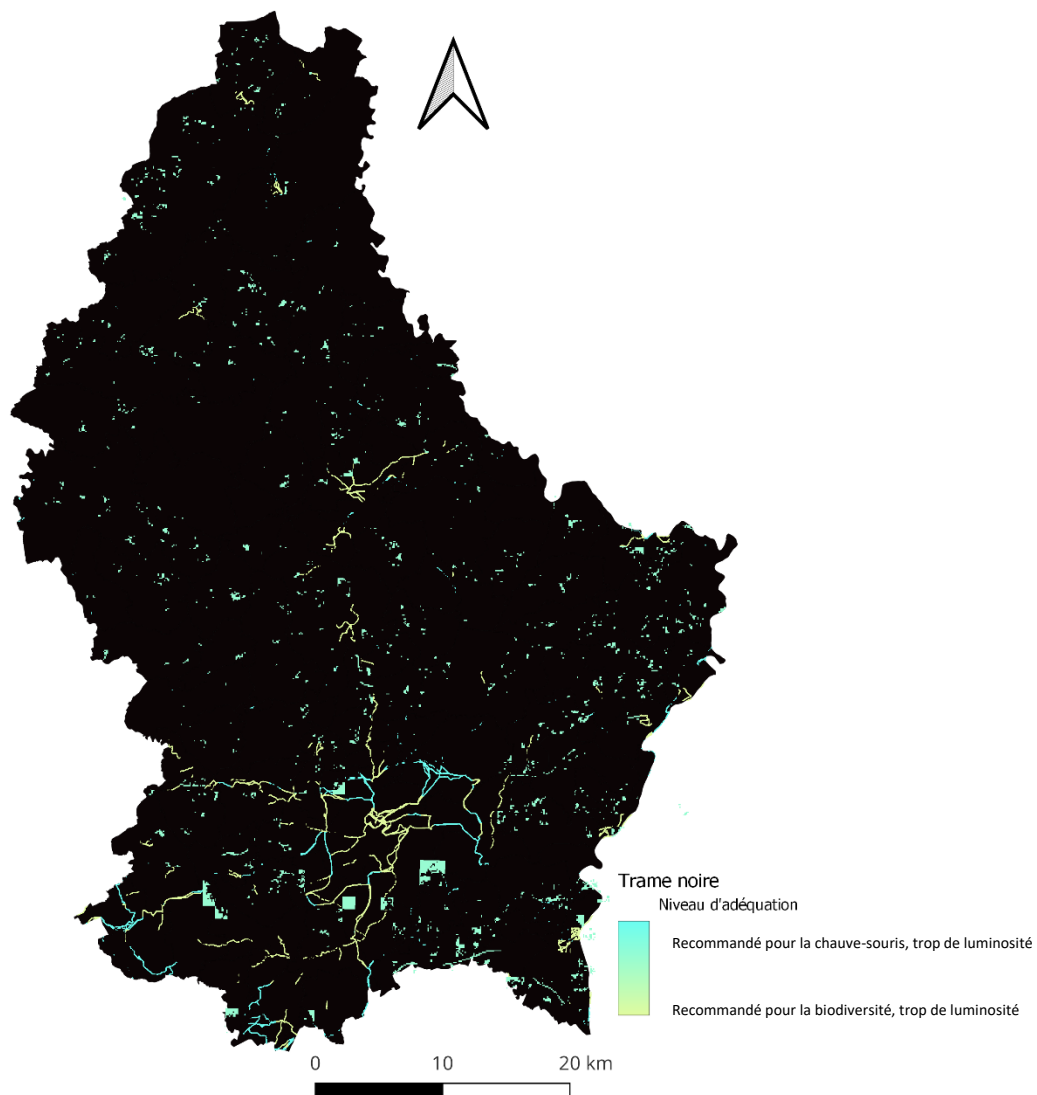


Figure 20: Identification des zones avec une luminosité élevée ($> 0.039 \text{ Cd/m}^2$) où une réduction de l'illumination ou un repos nocturne sont recommandés afin de protéger les espèces nocturnes.



Afin d'éclairer ce qu'il faut, quand il faut et comme il faut, nous suggérons de rétablir une obscurité accrue dans les zones identifiées comme peu appropriées en raison d'un éclairage excessif pour la faune nocturne (en vert clair sur la Figure 19 et Figure 20).

Ceci peut être réalisé en suivant les recommandations suivantes :

- 1) Identifier et éviter les éclairages inutiles en éclairant ce qu'il faut, quand il faut et comme il faut.
- 2) Ne pas éclairer les cours d'eau, ni les espaces naturels, ni les monuments.
- 3) Privilégier les dispositifs passifs.
- 4) Opter pour des systèmes « éclairage sur demande » afin d'allumer les lumières uniquement lorsque cela est nécessaire, par exemple lors du passage.
- 5) Émettre la plus faible quantité de lumière possible, dans un spectre restreint, et de couleur ambrée. Veiller à ce que l'installation des LED ne dépasse pas les 3000K et privilégier celles de 1800-1900 K. Assurer qu'aucune lumière ne soit diffusée au-dessus de l'horizontal.
- 6) Réduire au maximum la durée de l'éclairage (heure d'allumage et d'extinction adaptée aux saisons) et instaurer un repos nocturne.
- 7) Limiter l'éclairage publicitaire et instaurer un repos nocturne pour l'éclairage publicitaire.
- 8) Pour les terrains de sport, il est recommandé de limiter l'éclairage au terrain lui-même, sans éclairer les environs donc s'assurer qu'aucune lumière ne soit diffusée au-dessus de l'horizontal.
- 9) Revoir les normes et réglementations en tenant compte des nouvelles technologies d'éclairage telles que les LED, tout en intégrant des interdictions spécifiques dans les RGD (règlements grand-ducaux) des ZPIN, des critères adaptés dans les PAG/PAP, et éventuellement une nouvelle législation, notamment pour l'éclairage publicitaire.

En complément aux recommandations susmentionnées, nous proposons également les mesures suivantes pour renforcer et étendre les efforts de préservation de la faune nocturne dans les zones affectées par la luminosité :

- 1) Éduquer et sensibiliser : Mettre en œuvre des programmes éducatifs et des campagnes de sensibilisation pour informer les communautés locales, les gestionnaires d'éclairage, et le grand public sur les impacts de la pollution lumineuse et l'importance de préserver l'obscurité nocturne.
- 2) Coopération avec les autorités locales : Continuer à collaborer avec les autorités locales, les municipalités, et d'autres parties prenantes pour élaborer et mettre en œuvre des politiques d'éclairage respectueuses de la faune nocturne, favorisant ainsi une approche collective dans la gestion de la pollution lumineuse, comme cela se fait déjà dans les communes de Pëtschent et de Wolz. Cette démarche pourrait inclure établir une cartographie précise de toutes les installations d'éclairage public (lampadaires, projecteurs, etc.) au Luxembourg afin de mieux évaluer leur impact et d'optimiser leur gestion.
- 3) Impliquer les experts : Continuer à collaborer avec des spécialistes de la faune nocturne, des écologues et des experts en éclairage pour élaborer des solutions sur mesure adaptées à chaque situation locale, garantissant ainsi une approche scientifiquement informée.
- 4) Surveillance continue : Établir un suivi régulier utilisant les indicateurs proposés dans ce rapport pour évaluer l'efficacité des mesures prises et apporter des ajustements si nécessaire, en s'assurant que les objectifs de préservation de la faune nocturne sont atteints.



- 5) Engagement privé : Encourager les entreprises, propriétaires immobiliers et promoteurs à adopter des pratiques d'éclairage respectueuses de la faune sur leurs sites. Sensibilisation, incitations et collaborations pour préserver nos habitats nocturnes.

En outre, la préservation de l'obscurité nocturne contribue non seulement à la protection de la faune, mais elle présente également des avantages pour l'industrie du tourisme astronomique. Un ciel nocturne préservé offre des opportunités exceptionnelles pour le tourisme astronomique, attirant les amateurs d'astronomie à la recherche d'une visibilité optimale des étoiles, des planètes et d'autres phénomènes célestes. Cette synergie entre la protection de la faune nocturne et le tourisme astronomique souligne l'importance de préserver l'obscurité naturelle pour des bénéfices écologiques et économiques durables.

Limitations de la méthode proposée

Les limitations des données VIIRS pour l'évaluation de l'éclairage nocturne comprennent divers aspects. Tout d'abord, la résolution spatiale relativement faible des données VIIRS (environ 750 mètres) peut limiter la possibilité d'observer des variations détaillées de l'éclairage entre différentes zones urbaines, même après l'application de l'approche de WEO visant à augmenter la résolution VIIRS à une échelle fine et détaillée en utilisant les données de Sentinel-2. De plus, les données VIIRS peuvent être influencées par des facteurs tels que la réflexion de la lumière par les nuages, les conditions atmosphériques, l'angle de capture, les conditions de neige ou la végétation ce qui peut entraîner des inexactitudes dans l'estimation de l'intensité lumineuse réelle. Afin de limiter l'impact de ces facteurs, nous avons choisi de prendre des moyennes sur les trois mois d'hiver de chaque année pour cette étude.

Une autre limitation substantielle réside dans la capacité du VIIRS à discriminer entre les divers types d'éclairage et leur orientation, notamment entre les sources lumineuses LED et les éclairages conventionnels. Notre analyse met en évidence une corrélation négative modérément forte entre la luminosité et la proportion de LED, suggérant un lien entre l'augmentation de l'utilisation des LED et la diminution de la luminosité. Cependant, il est crucial de souligner que la corrélation observée ne présuppose pas de causalité directe. Pour une interprétation précise de cette relation, des analyses statistiques additionnelles ainsi qu'un contexte approfondi peuvent s'avérer nécessaires. En raison de la sensibilité générale du VIIRS à la lumière, sa capacité à différencier de manière précise entre les technologies d'éclairage peut être limitée, induisant ainsi des approximations dans l'évaluation de l'impact de l'adoption de sources lumineuses plus efficaces telles que les LED. Il est particulièrement pertinent de noter que les LED, avec leur teinte plus bleue par rapport aux sources lumineuses traditionnelles, pourraient contribuer potentiellement à une augmentation de la pollution lumineuse nocturne. Ces nuances soulignent l'importance de prendre en compte les caractéristiques spécifiques des technologies d'éclairage dans l'analyse d'une trame noire au Luxembourg, ceci potentiellement avec des données supplémentaires à ceux disponibles pour cette étude.

Parallèlement, il convient de noter que les limitations dans la collecte de données sur la biodiversité sont également présentes. Les jeux de données sur la biodiversité dépendent largement des personnes qui les collectent et des endroits qu'elles choisissent pour leurs relevés. Ce biais potentiel peut introduire des



disparités dans la représentation des écosystèmes, car certaines zones peuvent être plus fréquemment échantillonnées que d'autres en fonction de la facilité d'accès, de l'intérêt scientifique, ou d'autres facteurs. La diversité des observateurs, avec des niveaux d'expertise variables, peut également influencer la qualité des données recueillies. Ces biais dans la collecte de données sur la biodiversité soulignent la nécessité d'interpréter les résultats avec prudence et de reconnaître les limites inhérentes à la manière dont les données ont été rassemblées. Dans cette perspective, une correction biais a été appliquée aux données de cette étude et l'intégration des indicateurs spécifiques pour cette étude visent à améliorer la représentativité et l'objectivité des enquêtes sur la biodiversité.

Conclusion

L'établissement d'une Trame Noire se présente comme une stratégie fondamentale pour la conservation de la biodiversité nocturne. En intégrant diverses données, des corridors de la faune sauvage aux cours d'eau, aux zones protégées, ainsi que des informations générées au cours de l'étude telles que la luminosité nocturne et les 'hotspots' de biodiversité, cette approche offre une solution complète pour identifier, protéger et restaurer les zones sensibles à la lumière.

Cette initiative, amorcée le long des corridors de la faune sauvage et des cours d'eau, ainsi que dans les zones protégées telles que Natura 2000 ou ZPINs, se montre particulièrement pertinente dans des zones à haute densité d'espèces nocturnes volantes. Des espèces plus vulnérables à l'éclairage nocturne et représentatives pour les papillons de nuit, les chauves-souris, et les oiseaux migrateurs ont été prises en compte dans cette approche, soulignant la diversité des acteurs impliqués dans la vie nocturne.

L'utilisation de l'approche satellitaire, en particulier avec les données VIIRS, pour identifier la luminosité nocturne en détail dans tout le pays, offre une perspective novatrice et pratique pour un suivi à long terme de la luminosité au Luxembourg. En analysant les 'hotspots' de biodiversité nocturne ainsi que la présence d'espèces emblématiques, la Trame Noire se dote d'une méthodologie robuste pour guider les actions de conservation. Pour les zones inappropriées en raison d'une luminosité excessive, les recommandations visent à rétablir l'obscurité en identifiant et en évitant les éclairages inutiles, en privilégiant les dispositifs passifs, et en optant pour des systèmes « éclairage sur demande ». Ainsi, la Trame Noire propose une approche à long terme pour la préservation de la vie nocturne.