
**Etude de la pollution lumineuse dans le cadre de la création d'une Trame Noire.
Approche transversale pour la valorisation des paysages nocturnes. Le cas du
Parc naturel Burdinale-Mehaigne, Wallonie**

Auteur : Angerand, Charlotte

Promoteur(s) : Gobbe, Emmanuelle

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master architecte paysagiste, à finalité spécialisée

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/11891>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**ETUDE DE LA POLLUTION LUMINEUSE
DANS LE CADRE DE LA CREATION D'UNE TRAME NOIRE.
APPROCHE TRANSVERSALE POUR LA VALORISATION
DES PAYSAGES NOCTURNES.**

**LE CAS DU PARC NATUREL
BURDINALE-MEHAIGNE, WALLONIE**

Charlotte ANGERAND

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER D'ARCHITECTE PAYSAGISTE
ANNÉE ACADÉMIQUE 2020-2021**

PROMOTEUR : Emmanuelle GOBBE

© « *Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être autorisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et du Président du Comité de Gestion de la formation en Architecte Paysagiste.* »

Remerciements

Je tiens à remercier les personnes qui m'ont accompagné pour la réalisation de ce Travail de Fin d'Étude.

Je remercie le groupe de travail sur les Trames Noires, Thierry Kervyn et Nicolas Nerdelandt, pour leurs conseils et leur disponibilité.

Je remercie également l'équipe du Parc naturel Burdinale-Mehaigne, et tout particulièrement Mélanie Cuvelier, Pascaline Auriol et Amandine Degen, pour l'aide précieuse qu'elles m'ont apporté, leurs conseils et leur enthousiasme.

Je remercie mes proches pour leur soutien infaillible et leurs encouragements. Un merci tout particulier à Kelly Maxel qui m'a soutenu tout au long de mes études, pour son écoute, sa patience et sa positivité. Merci également à mes parents pour leur implication, leurs relectures et critiques qui m'ont énormément aidé pour ce travail.

Je remercie ma promotrice, Emmanuelle Gobbe, pour la confiance accordée pour le choix du sujet de recherche.

Je vous remercie pour votre temps, l'intérêt porté à mon travail mais surtout pour votre bonne humeur et vos encouragements !

Résumé

La lumière artificielle nocturne est aujourd'hui reconnue comme l'une des plus fortes pressions de sélection sur la biodiversité au niveau mondial.

Notre façon d'éclairer la nuit devient un sujet de préoccupation pour la préservation des espèces, des habitats et des écosystèmes.

L'apparition de nouvelles technologies et techniques d'éclairage permet de vastes possibilités pour éclairer nos territoires et créer nos paysages nocturnes.

Ces possibilités sont cependant peu utilisées en milieu rural, où la dualité éclairage-biodiversité débouche sur des compromis entre un éclairage fonctionnel et les besoins en obscurité des espèces.

Ce travail cartographique prépare la mise en place d'une Trame Noire – une trame d'obscurité – sur le Parc naturel Burdinale-Mehaigne en Wallonie.

A finalité, nous réalisons un support précis concernant les enjeux entre éclairage et biodiversité. Ce support, accompagné de l'ensemble de l'étude, a pour objectif de guider une future intervention paysagère nocturne.

Pour cela, nous évaluons l'emprise de l'éclairage nocturne (public et privé) sur le territoire, ainsi que les besoins en obscurité de la biodiversité à travers le concept d'espèce parapluie appliqué aux chiroptères.

Nous quantifions l'impact de l'éclairage actuel ainsi que celui d'un scénario futur – réel – sur la biodiversité identifiée.

Cette démarche nous permet l'identification des points de conflit entre éclairage et biodiversité à l'échelle du luminaire.

Une hiérarchisation des conflits établie un ordre de priorité sur les interventions à mener sur l'éclairage.

Enfin, l'utilisation d'une typologie des espaces urbanisés du cas d'étude, bâtis et réseaux de mobilité, permet de réunir la presque totalité des points de conflit selon ces espaces.

Ainsi nous obtenons un support cartographique comprenant les éclairages conflictuels pour la biodiversité. Les nombreuses variables connues de la lumière peuvent désormais être utilisées par un professionnel afin de créer des ambiances paysagères pour chaque typologie d'espaces.

Cette démarche est une première approche pour la mise en place d'une Trame Noire et la création d'une identité nocturne sur le territoire du Parc naturel Budinale-Mehaigne.

Mots-clés : Lumière artificielle / Pollution lumineuse / Obscurité / Biodiversité / Trame Noire / Chiroptère / Espèce parapluie / Parc naturel/ Paysage nocturne

Abstract

Artificial light at night is recognized as one of the global strongest selection pressures on biodiversity. Our way of lighting at night is becoming a matter of concern for the preservation of species, habitats and ecosystems.

Emergence of new lighting technologies and techniques opens up huge possibilities for illuminating our territories and creating our nocturnal landscapes.

However, these possibilities are few used in rural areas, where the lighting-biodiversity duality leads to compromises between functional lighting and darkness needs of species.

This cartographic work prepares the installation of a Trame Noire – darkness network - in the Nature Park Burdinale-Mehaigne in Wallonia.

Ultimately, we provide a specific tool concerning the issues between artificial light and biodiversity at night. This tool and support, along with the entire study, aims to guide a future night landscape intervention.

For this, we assess the influence of night lighting (public and private) on the territory, as well as the darkness needs of biodiversity through the concept of umbrella species applied to bats.

We quantify both the impact of the current lighting and a future - realistic - scenario on the identified biodiversity.

This approach allows us to identify conflicts between lighting and biodiversity at the level of a street lamp.

A hierarchy of conflicts establishes a priority order on interventions to be carried out on lighting.

Finally, the use of a typology of urbanized spaces in the study case, buildings and mobility networks, makes it possible to bring together almost all conflict according to these spaces.

Thus we obtain a cartographic support including conflicting street lamps for biodiversity. The many known variables of light can now be used by a professional to create landscape atmospheres for each type of space.

Thus, Budinale-Mehaigne Nature Park can set up a Trame Noire and create a nocturnal identity on its territory.

Key-words : Artificial light / Light pollution / Darkness / Biodiversity / Trame Noire / Bat / Umbrella specie / Nature Park / Nocturnal landscape

Table des matières

Introduction.....	1
Etude bibliographique.....	2
1. L'homme face à la nuit.....	3
1.1. Définir la nuit.....	3
1.2. Evolution de l'éclairage.....	6
1.3. Insécurité relative.....	7
2. La lumière artificielle.....	9
2.1. Comprendre la lumière.....	9
2.1.1. Définition et caractéristiques.....	9
2.1.2. Mesurer la lumière artificielle nocturne.....	12
2.2. De la lumière artificielle à la pollution lumineuse.....	13
2.3. Comprendre la pollution lumineuse.....	14
2.4. Connaissances actuelles sur le lien entre ALAN et biodiversité.....	17
2.4.1. Quelle biodiversité.....	17
2.4.1.1. Flore.....	18
2.4.1.2. Faune.....	19
2.4.2. Quelle lumière.....	22
2.4.3. Polémique autour des LEDs.....	24
3. Gestions et protections de la nuit.....	27
3.1. La nuit est une ressource.....	27
3.2. Patrimoine mondial, UNESCO et réserves étoilées.....	28
3.3. Législation, état des lieux européens et cas belge.....	29
3.4. Démarches locales et guide(s) des bonnes pratiques.....	31
3.5. Trames Noires.....	32
3.5.1. Définition.....	32
3.5.2. Mise en place de Trames Noires.....	33
3.5.2.1. Etude TRAMENOIRE en métropole lilloise.....	34
3.5.2.2. Trame Noire des Vosges Centrales, France.....	35
3.5.2.3. Prémices d'une Trame Noire wallonne.....	36
4. Conclusion.....	38
Hypothèses et objectifs.....	40
Matériels et Méthodes.....	42
1. Méthode générale et cas d'étude.....	42
2. Etapes détaillées de la méthodologie.....	44
2.1. Construction d'une base de données.....	44
2.1.1. Trame Lumière.....	44
2.1.1.1. Trame lumineuse principale.....	44
2.1.1.2. Ortho-photographie nocturne.....	47
2.1.1.3. Données locales.....	48
2.1.1.4. Données sur le cas d'étude.....	49
2.1.1.4.1. Trame lumineuse principale du Parc.....	49
2.1.1.4.2. Ortho-photographie nocturne du Parc.....	49
2.1.1.4.3. Données locales du Parc.....	49
2.1.2. Trame Biodiversité.....	50
2.1.2.1. Trame Espèces.....	51
2.1.2.2. Trame Habitats.....	51
2.1.2.3. Données sur le cas d'étude.....	52

2.2. Modéliser la situation actuelle	54
2.3. Modéliser un scénario futur	55
2.4. Evaluer l'évolution de la fragmentation du paysage nocturne pour la biodiversité	56
2.5. Identifier les points de conflit entre éclairage et biodiversité dans le scénario futur	56
2.6. Analyse des points de conflit	56
2.7. Définir des typologies d'espaces.....	57
Résultats	58
1. Modélisation de la situation actuelle	58
1.1. Trame Lumière actuelle.....	58
1.2. Trame Biodiversité	60
1.3. Estimation de la fragmentation du paysage nocturne.....	61
2. Modélisation du scénario 2030	62
2.1. Trame Lumière 2030	63
2.2. Estimation de la fragmentation du paysage nocturne.....	64
3. Comparaison de la fragmentation du paysage nocturne pour la faune, situation actuelle et scénario 2030	65
4. Identification et analyse des points de conflit	67
5. Regroupement des points de conflit par typologie d'espaces	70
Discussion	73
1. Discussion des résultats	73
1.1. Modélisation	73
1.2. Fragmentation de la Trame Biodiversité.....	73
1.3. Identification et analyse des conflits biodiversité-éclairage	75
1.4. Utilisation d'une typologie d'espaces	76
2. Discussion du matériel et de la méthode	77
2.1. Trame Lumière	77
2.2. Trame Biodiversité	79
2.3. Evaluation de la fragmentation de la Trame Biodiversité.....	80
2.4. Identification des points de conflit	81
2.5. Utilisation d'une typologie d'espaces	81
Conclusion et perspectives	83
Bibliographie	84
Table des figures	90
Table des tableaux	92
ANNEXES	93

Introduction

Il était estimé en 2016 que la perte de la nuit concerne plus de 23% des terres émergées à l'échelle mondiale, et 88% en Europe (Falchi et al.). L'obscurité régresse et la visibilité des étoiles s'amointrit avec notre ciel nocturne presque sept fois plus lumineux qu'il y a cent ans (Lévy, 2005).

Cette perte est due à la lumière artificielle nocturne - nommée *ALAN*¹ –, dont l'utilisation prend de l'ampleur : chaque année, elle gagne 2,2% des terres mondiales, et son intensité augmente de 1,8% (Laforge et al., 2019) (Figure 1).

L'ALAN perturbe l'alternance naturelle du jour et de la nuit, et devient une menace globale pour la biodiversité pouvant aboutir à une détérioration irréversible des écosystèmes ; il s'agit de pollution lumineuse. (Hölker et al., 2010; Longcore & Rich, 2004; Pawson & Bader, 2014)

La Belgique se démarque au niveau mondial avec un territoire particulièrement pollué.

Parmi les pays ayant perdu la visibilité de la voie lactée sur la surface de leur territoire, le *nouvel atlas mondial de la luminosité artificielle de ciel nocturne* situe la Belgique en 5^{ème} position mondiale avec 51% du territoire où la pollution lumineuse masque la voie lactée. (Falchi et al., 2016)

Cela est lié à son réseau d'éclairage particulièrement développé, où l'on estime une moyenne de 1,9 lampadaire par habitant du pays, contre 1,2 pour l'Europe. (ASCEN, 2019; Natagora, 2020a).

Lors de la dernière décennie, une prise de conscience des effets néfastes de l'ALAN sur le monde du vivant et sur l'accès à un ciel nocturne de qualité a mené à de multiples actions de lutte contre la pollution lumineuse. Parmi celles-ci, nous retrouvons la réalisation de Trames Noires, également appelées Trames Sombres ou Etoilées, qui ont pour objectif la limitation de la fragmentation des paysages nocturnes par la lumière. Il s'agit de réseaux d'obscurité, composés de zones centrales et de liaisons, soutenant les Trames Vertes et Bleues déjà existantes, ainsi que la biodiversité.

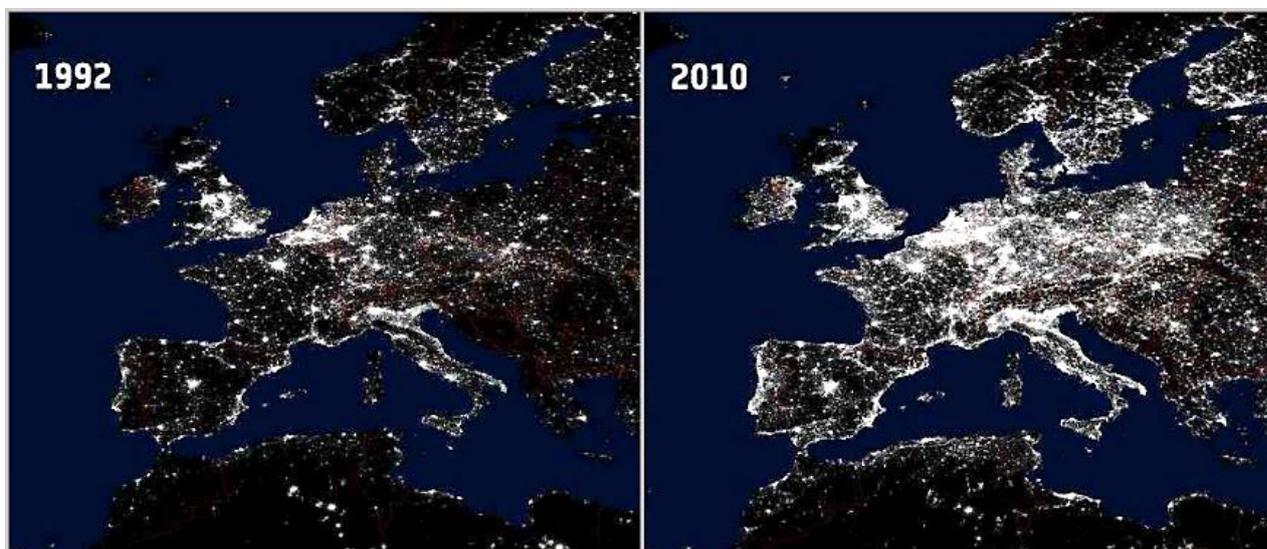


Figure 1 : Evolution de la lumière artificielle nocturne sur le territoire européen entre 1992 et 2010, clichés nocturnes satellitaires. Source : ASCEN, 2019

¹ ALAN : Artificial Light At Night, lumière artificielle nocturne

Les axes d'approches de la problématique de la pollution lumineuse sont multiples : fragmentation de l'environnement nocturne, techniques d'éclairage, sécurité, ciel étoilé...

L'approche paysagère est quant à elle moins fréquente, et se cantonne au milieu urbain. Les espaces ruraux témoignent le plus souvent d'une approche binaire et fonctionnelle, devant répondre aux besoins de la biodiversité ou aux usages anthropiques.

Notre travail cherche à déterminer s'il est possible d'aborder la question de la pollution lumineuse en milieu rural de manière transversale, alliant la biodiversité et le paysage nocturne.

Pour cela, nous nous intéressons au cas d'un *Parc naturel*² wallon : le Parc Burdinale-Mehaigne. Bien que la Belgique soit particulièrement touchée par la pollution lumineuse, il n'existe pas encore de réseau d'obscurité comme les Trame Noires sur le territoire wallon.

Les Parcs naturels sont des territoires ruraux riches en biodiversité et la question de l'éclairage – excessif - prend de l'importance. Ce sont également des territoires à forte valeur patrimoniale, et souhaitant la mise en valeur de leur(s) identité(s) paysagère(s).

Le mise en place d'une Trame Noire sur un Parc naturel offre donc l'opportunité de repenser l'éclairage de façon transversale : travailler une identité paysagère nocturne sur le Parc en respectant les besoins de la biodiversité.

La question qui guidera notre recherche est la suivante :

Peut-on préparer une intervention paysagère nocturne prenant en compte la pollution lumineuse écologique à l'échelle d'un Parc naturel en Wallonie ?

A finalité, nous cherchons à offrir un support pour la création d'une Trame Noire à l'échelle du Parc naturel Burdinale-Mehaigne permettant :

- Le respect des besoins en obscurité de la biodiversité
- La création d'une identité paysagère nocturne propre au Parc

Nous débuterons par une étude bibliographique autour des thématiques de la nuit, de la pollution lumineuse, et des actions en faveur de l'obscurité telle que la Trame Noire.

Nous chercherons ensuite à répondre à notre question de recherche sur le Parc naturel Burdinale-Mehaigne en plusieurs étapes :

- Quantifier et qualifier l'ALAN et la biodiversité sur notre cas d'étude
- Anticiper dans un scénario futur les impacts potentiels de l'éclairage sur la biodiversité
- Identifier les conflits entre biodiversité et éclairage sur le Parc
- Regrouper les conflits selon une typologie d'espaces représentative du cas d'étude

*Parc naturel*² : territoire rural habité de forte valeur patrimoniale, abritant une faune et une flore encore nombreuses et diversifiées. (Région wallonne, 2008)

Etude bibliographique

1. L'homme face à la nuit

*“For my part I know nothing with any certainty,
but the sight of the stars makes me dream.”*

Vincent van Gogh

1.1. Définir la nuit

Qu'est-ce que la nuit ?

La question semble simple. Nous verrons pourtant dans les lignes qui suivent que la nuit, tant à travers ses définitions que par ce qu'elle représente, est une notion complexe qui mérite que l'on s'y attarde.

Tout d'abord, « nuit » possède plusieurs définitions. Le dictionnaire de l'Académie française (1986) en propose trois :

- « Durée séparant le coucher et le lever du soleil, et pendant laquelle règne l'obscurité. »
- « Obscurité, disparition de la lumière, après le coucher du soleil. »
- « Cette durée consacrée au sommeil, au repos, etc. »

Un second dictionnaire propose : « obscurité qui enveloppe quotidiennement une partie de la Terre du fait de sa rotation. » (Le Robert, n.d.-b)

La nuit peut donc se définir comme une durée caractérisée par l'absence de lumière, liée à la rotation terrestre, et dont l'« usage » est entre autres celui du repos. En ce sens, la nuit n'est pas la même pour tous comme le remarque Luc Gwiazdzinski : elle varie de manière spatio-temporelle, selon la latitude, la longitude, la météorologie ou la saison (2016b).

Mais le mot nuit possède également des sens figurés.

Comme le précise L. Gwiazdzinski : « Au-delà des définitions strictes de l'astronomie, peu de mots ont autant de significations différentes. La nuit n'est pas vécue partout et par tous de la même façon. Elle peut signifier angoisse ou rêverie, peur ou quiétude, vigilance ou repos, insécurité ou liberté. » (2016b)

La nuit peut représenter la mort (Le Robert, n.d.-b) ou l'inconnaissable et l'incompréhensible (Académie française, 1986). Cette dernière définition est bien ancrée dans la langue française, et s'illustre dans de nombreuses expressions. Comme l'observe L. Gwiazdzinski (2016b) la nuit – et par extension l'obscurité – est assimilée à l'ignorance et le jour – la lumière – à l'évidence, la connaissance. L'auteur cite : « faire la lumière », « éclaircir la situation », « chasser l'obscurité », « au grand jour », « depuis la nuit des temps »... Les exemples ne manquent pas.

La nuit est une expérience vécue par chaque individu. Elle représente et englobe une multitude d'aspects qui ont été – et sont - essentiels pour l'Homme.

A son origine, la relation Homme-nuit correspondait à la perte de visibilité et aux changements de perception dus à l'obscurité. Mis dans une position de faiblesse face aux dangers potentiels tels que les attaques d'animaux sauvages, l'Homme a développé une peur de la nuit (Auricoste et al., 2018).

Au cours de son évolution, l'Homme enrichit et complexifie son rapport à l'obscurité.

Si la nuit peut signifier l'inconnaissable et/ou l'incompréhensible (Académie française, 1986), elle est paradoxalement aussi un espace-temps important pour l'émancipation de la pensée. Ainsi, le jour nous voyons le monde et nous vivons à travers lui, tandis que la nuit tombée nos perceptions se muent et nous invitent à l'introspection (Lévy, 2005). Cela s'observe avec l'inspiration qu'ont puisée les artistes de l'obscurité à travers l'histoire, notamment les poètes en quête de liberté. Ainsi on retrouve dès le XVIème siècle une littérature élogieuse de la nuit obscure, par exemple à travers les écrits de la poète Gaspara Stampa dans *nuit candide (notte candida)* qui décrit la nuit « plus belle et plus heureuse que les jours les plus heureux et les plus beaux. » (Gwiadzinski, 2016b). Arrive ensuite chez Baudelaire, Rimbaud, Ronsard, C. de Pontoux et bien d'autres la volonté de défendre la nuit et ses bienfaits. Citons également Novalis qui publie en 1800 un ensemble de poèmes, les *Hymnes à la nuit (Hymnen an die Nacht)*, aujourd'hui symbole du romantisme allemand, qui met en avant l'importance de l'obscurité dans la découverte de soi (Meitinger, 2011). L'obscurité n'est pas seulement une muse pour l'écriture, elle est également une alliée à la création : l'écrivain Marcel Proust disait « Les grands livres doivent être les enfants non du grand jour et de la causerie mais de l'obscurité et du silence ». (Gwiadzinski, 2016b)

La vision populaire de la nuit obscure reste néanmoins angoissante. La peur de la nuit et de l'obscurité est particulièrement présente en occident, liée à un héritage culturel et notamment religieux. Notons par exemple les origines de la nuit selon la Genèse (1:4) : « Dieu vit que la lumière était bonne, et dieu sépara la lumière et les ténèbres. Dieu appela la lumière « jour » et les ténèbres « nuit ». »

A cette interprétation de la nuit s'ajoutent de nombreuses superstitions, où l'on retrouve monstres, esprits malfaisants et animaux maléfiques rodant dans l'obscurité (Gwiadzinski, 2016b).

L'obscurité n'est pas la seule composante inspirante de la nuit : elle s'accompagne de la visibilité des étoiles. Si ces dernières composent en permanence notre ciel, l'obscurité est nécessaire pour avoir un contraste suffisant avec la lumière qu'elles dégagent et ainsi les observer depuis la Terre. Si dans notre imaginaire la nuit est souvent reliée aux peurs, le ciel étoilé est toujours considéré comme une source d'émerveillement.

Le ciel étoilé nocturne a eu une influence sur l'Homme dans de nombreux domaines : l'art, la littérature, la philosophie, la religion, la science (Cinzano et al., 2000).

A travers son livre *Sauver la nuit*, Samuel Challéat qualifie le rapport de l'Homme au ciel étoilé de « [...] relation visuelle directe avec cette inépuisable ressource historique, littéraire, philosophique, religieuse, paysagère ou encore artistique qui participe à notre individuation, de la constitution de notre être, de notre rapport à l'Autre et au monde vivant » (Challéat, 2019).

Les artistes se sont en tout temps inspirés du ciel étoilé ; citons par exemple le tableau de Van Gogh *la nuit étoilée* (Figure 2), ou les compositions *les nocturnes* de Chopin.



Figure 2 : la nuit étoilée de Van Gogh, 1889.
Source : Museum of Modern Art

Les étoiles ont également intrigué l'Homme qui les a assimilées à des divinités, elles nous ont permis de projeter nos figures fantastiques pour former les constellations, elles ont orienté les explorateurs sur les mers et océans... Les étoiles nous ont poussés à nous questionner sur notre place sur Terre et dans l'univers (Gwiazdzinski, 2016b). L'astronomie est d'ailleurs considérée comme la science naturelle la plus ancienne, pratiquée depuis la préhistoire (Challéat, 2019).

La nuit obscure et étoilée a marqué l'Homme dans son histoire, mais qu'en est-il aujourd'hui ?

Nous observons actuellement une « perte de la nuit », avec une disparition de l'obscurité et une diminution de la visibilité des étoiles. Il était estimé en 2016 que cette perte concernait plus de 23% des terres émergées à l'échelle mondiale, et 88% en Europe (Falchi et al.).

Une question se pose donc, qu'Olivier Las Vergnas (2007), président de l'Association Française d'Astronomie et créateur des « Nuits des Etoiles », formule ainsi :

« Si nous ne pouvons plus voir les constellations, la voie lactée, les étoiles filantes, et y projeter notre imaginaire et notre humanité, comment pourrions-nous encore imaginer, rêver et penser notre place dans l'univers ? »

Nous parlons ici des dommages générés par notre utilisation excessive de l'éclairage artificiel la nuit, nommée « pollution lumineuse ». Cette dernière engendre la disparition de l'obscurité nocturne et par conséquent de la visibilité du ciel étoilé. Les définitions de la « nuit » telles que nous les avons vues ne sont, en partie, plus d'actualité. Gwiazdzinski propose même une requalification de la nuit du XXIème siècle comme un « non-jour », où l'obscurité n'est jamais totale et où les activités ne s'arrêtent plus au crépuscule. (Gwiazdzinski, 2005)

Si aujourd'hui *la nuit* n'est plus, les artistes continuent de la représenter. Citons ici le travail de Thierry Cohen qui image les grandes villes du monde sans éclairage artificiel (Figure 3), œuvres photographiques réalistes nous rappelant le rapport perdu au ciel nocturne.



Figure 3 : PARIS 48° 52' 16" N 2012-06-17 LST 17:30. Source : Cohen et al., 2012

1.2. Evolution de l'éclairage

L'éclairage se définit comme l'action d'éclairer artificiellement (Le Robert, n.d.-a), c'est-à-dire l'action humaine apportant une source de lumière naturellement absente.

Avec cette définition, nous pouvons parler des débuts de l'éclairage public avec la domestication du feu, il y a plus de 100 000 ans au Paléolithique, quand l'homme apprend à manipuler les flammes pour éclairer un espace partagé. Le feu permet pour la première fois de prolonger le jour et ainsi chasser la nuit, éloigner les dangers liés à l'obscurité et au final, conquérir l'espace et le temps (De Lumley, 2017). Le début des illuminations urbaines date du II^{ème} siècle après J.-C. ; on en retrouve des traces dans les cités romaines. Suit le Moyen-Âge, où l'éclairage des villes est encore ponctuel et où la lumière permet de se repérer plus que de s'éclairer. A la fin du Moyen-Age s'ajoute une utilisation occasionnelle de l'éclairage : pendant les périodes festives (pour la mise en valeur) et les périodes de crise (pour faciliter le contrôle des patrouilles). Au XIV^{ème} siècle, l'éclairage est monopolisé par le pouvoir et la religion. C'est aux XV^{ème} et XVI^{ème} siècles que les illuminations s'étendent à la population alors en charge de l'éclairage extérieur. (Reculin, 2017)

C'est au XVII^{ème} siècle que les pouvoirs publics – en Europe – vont prendre le contrôle de l'éclairage des villes. Cela a notamment pour objectif de montrer leur puissance en faisant une démonstration de la capacité technique à faire reculer la nuit. Paris est référencée comme la ville européenne pionnière de l'éclairage public avec l'installation de ses lanternes en 1667 (Auricoste et al., 2018; Bovet-Pavy, 2018). Les grandes villes d'Europe du Nord-Ouest, ayant un régime d'ensoleillement moins favorable que celui des villes d'Europe du Sud, suivent l'exemple de Paris ; Amsterdam met en place l'éclairage public en 1669, Bruxelles en 1675. (Reculin, 2017)

A partir de la mise en place de l'éclairage public à la fin du XVII^{ème} siècle, son évolution jusqu'au XX^{ème} siècle est en grande partie quantitative : le nombre de lanternes se multiplie dans les villes. La lumière artificielle est alors produite par une flamme obtenue par la combustion d'huile ou de gaz. Arrive le XX^{ème} siècle, période riche en innovations et à laquelle nous portons un intérêt particulier dans cette étude.

Le début du XX^{ème} siècle voit l'essor de l'éclairage à l'électricité. Dans le cadre de recherches pour éclairer mieux (dans une pensée fonctionnelle) et à moindre coûts énergétique et économique, on met au point de nouvelles lampes :

- les tubes luminescents (1910),
- les sources à vapeur de mercure haute pression (1929),
- les sources à vapeur de sodium basse pression (1932),
- les sources fluorescentes basse tension (1936),
- les tubes fluorescents lors de la seconde Guerre Mondiale. (Challéat, 2019)

Le XX^{ème} siècle est également marqué par l'essor de l'automobile. Couplons à cela la formulation bien connue « form follows function » de Louis H. Sullivan : on remarque que notre éclairage est en grande partie structuré autour du transport automobile et des voiries. L'essor de la voiture s'est donc accompagné d'une augmentation de l'éclairage. (Challéat, 2019)

La seconde moitié du XX^{ème} siècle voit la diversification des sources lumineuses et l'augmentation de leur nombre sur le territoire avec l'électrification des campagnes, appuyé par le faible coût de l'électricité (MEB - ANPCEN, 2015). Apparaît également une nouvelle raison d'éclairer, ni pour le

confort ni pour la sécurité mais pour la mise en valeur. C'est un nouveau marché pour l'éclairage public qui n'avait jusqu'alors pas été exploré, et dont se saisissent les acteurs économiques de l'éclairage. La mise en valeur du patrimoine par la lumière devient une nouvelle discipline ; qu'il s'agisse du patrimoine bâti ou naturel, illuminons ! (Lazou & Kimenau, 2020).

Jusque dans les années 1960-1970, l'éclairage public se compose en grande majorité de lampes Sodium basse pression, émettant une lumière chaude dans les teintes orangées. Avec de nouvelles innovations et techniques d'éclairage, la lumière devient jaune (Sodium Haute Pression), puis de plus en plus froide et blanche (jusqu'aux LEDs actuelles). (MEB - ANPCEN, 2015) Ces changements s'accompagnent par une nette augmentation des surfaces éclairées dans les années 1970, car ces nouvelles technologies coûtent moins cher.

Le déploiement de la lumière artificielle nocturne s'accompagne d'une standardisation au niveau international de l'éclairage. C'est ainsi qu'en 1965 sont publiées pour la première fois par la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) les *Recommandations internationales pour l'éclairage des voies publiques* (Challéat, 2019), présentant l'évolution des outils des éclairagistes, et apportant des conseils d'application et de gestion.

Si aujourd'hui la question de l'éclairage « juste » se pose, les arguments en faveur de la diffusion et de la prolifération de la lumière artificielle nocturne (appelée ALAN) sont tout de même nombreux. Un des arguments majeurs est l'aspect sécuritaire apporté par l'éclairage (Challéat, 2019)(argument approfondi dans la partie 1.3. de ce rapport). L'argument de l'attractivité, en termes de tourisme et de cadre de vie, est également en faveur du déploiement de l'éclairage. La nuit crée deux types d'attractions, celle de la nuit obscure et des étoiles, ainsi que celle des jeux de lumières. La seconde est plus connue du grand public, et ses retombées économiques conséquentes. Avec l'urbanisme de communication, mettant les localités en concurrence, apparaissent de nombreux corps de métier autour de l'éclairage : concepteurs, architectes et designers lumière sont actuellement des acteurs clés des projets d'aménagement (Challéat, 2019).

Durant les dernières décennies, on estime que l'ALAN a vu sa surface augmenter de 6%/an (Hölker et al., 2010), et qu'elle continue d'augmenter aujourd'hui en termes de surface, durée et intensité (Schroer & Hölker, 2016).

1.3. Insécurité relative

Il est ici important de faire la distinction entre le sentiment d'insécurité et l'insécurité réelle. Alors que l'insécurité repose sur des faits objectifs tels que les statistiques portant sur la délinquance, le sentiment d'insécurité est subjectif car il représente le ressenti des usagers.

Le lien entre obscurité et sentiment d'insécurité nous est familier.

L'obscurité apporte avec elle son lot d'inconforts, dont la perte partielle de la visibilité : notre perception de l'espace change. L'obscurité est également nourrie de contes et légendes qui l'associent au danger : la crainte de la nuit fait partie de notre bagage culturel.

Pourtant, différentes études montrent, contre-instinctivement, qu'il n'y a pas de lien établi entre obscurité et insécurité réelle, ou éclairage et sécurité réelle.

Ainsi :

- Le rapport sur les nuisances liées à la pollution lumineuse du gouvernement français (Auricoste et al., 2018) met en avant l'absence de corrélation entre éclairage et sécurité.

- L'ouvrage *Lumières sur la ville* (Bovet-Pavy, 2018) appuie le constat : il mentionne que les études universitaires sur l'éclairage urbain ne concluent pas que délits et obscurité sont liés. De plus, l'étude bibliographique menée dans l'ouvrage laisse présumer qu'aucune hausse des crimes et délits n'est induite par une baisse de l'éclairage, que ce soit au niveau de son intensité ou de son emprise spatiale. (Bovet-Pavy, 2018)

- Dans son ouvrage *La nuit, dernière frontière*, Luc Gwiazdzinski (2016a) présente une étude statistique qui montre d'une part, que la mortalité globale nocturne est plus faible que la mortalité diurne, d'autre part, que la proportion de délits commis la nuit est inférieure à 50%. Il précise que si la délinquance n'est pas augmentée par l'obscurité, le plus grand nombre d'incivilités et dégradations, favorisées par la perte de luminosité, a lieu en marge de la nuit, dans la soirée, exacerbant ainsi le sentiment d'insécurité des populations. S'agissant de la sécurité routière, l'auteur nous apprend que seulement un tiers des accidents a lieu la nuit, mais avec une mortalité plus importante que le jour : ils représentent la moitié des morts sur route. Cependant la grande majorité de ces accidents nocturnes a lieu dans des zones éclairées.

Le lien que nous faisons spontanément entre obscurité et danger, entre lumière et sécurité, n'est donc pas scientifiquement validé.

On parle donc ici de l'obscurité comme cause d'un sentiment d'insécurité et non d'une insécurité réelle, de l'éclairage comme source d'un sentiment de sécurité et non d'une sécurité réelle.

La puissance de ce sentiment d'insécurité face à l'obscurité s'est illustrée en France quand, après avoir appliqué les normes européennes de 2005 sur la diminution de l'éclairage artificiel, de nombreux élus ont souhaité faire marche arrière alors qu'aucun fait ne venait prouver une augmentation de l'insécurité. (Bovet-Pavy, 2018)

2. La lumière artificielle

*« Plus claire la lumière, plus sombre l'obscurité...
Il est impossible d'apprécier correctement la lumière sans connaître les ténèbres »*

Jean-Paul Sartre

2.1. Comprendre la lumière

La lumière évoque dans un premier temps le rayonnement du soleil apportant la clarté du jour. Il est cependant possible de distinguer la lumière durant la journée et durant la nuit, ainsi que la lumière naturelle et artificielle.

La lumière naturelle nocturne provient de corps célestes (rayons solaires sur la lune), des étoiles ainsi que des émissions atmosphériques naturelles (Falchi et al., 2016). L'ALAN correspond quant à elle à toute lumière émise par des sources artificielles entre le crépuscule et l'aube. Nous nous intéressons ici à la lumière nocturne, et plus précisément à la lumière artificielle nocturne.

La partie suivante présente les grandes caractéristiques de la lumière.

2.1.1. Définition et caractéristiques

La lumière est un phénomène complexe, se composant de nombreux paramètres qu'il est important de comprendre afin de pouvoir appréhender le concept de lumière artificielle nocturne.

La lumière est une onde électromagnétique pouvant être caractérisée par une longueur d'onde (λ) exprimée en nanomètre (nm). L'ensemble des longueurs d'onde représente le spectre de la lumière pouvant se décomposer en 3 catégories :

- Le rayonnement ultraviolet ($\lambda < 400$ nm)
- Le rayonnement visible ($400 \text{ nm} < \lambda < 700$ nm)
- Le rayonnement infra-rouge ($\lambda > 700$ nm)

Le spectre du visible correspond aux longueurs d'onde visibles par l'œil humain. Ce sont les valeurs (nanomètres) de ce spectre qui définissent les couleurs que nous percevons, comme l'illustre le Tableau 1.

Tableau 1 : Longueurs d'onde du spectre lumineux. Source : MEB - ANPCEN, 2015

Longueur d'onde	Ultra-Violet	Violet	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge	Infra-Rouge
λ (nm)	< 400	400-420	420-500	500-575	575-585	585-605	605-700	>700

Notons que les longueurs d'onde que l'œil est capable de percevoir dépendent de l'espèce. Certaines espèces peuvent donc percevoir ce que l'œil humain ne voit pas. Le *Deilephila elpenor* en est un exemple : les yeux de ce papillon de nuit sont particulièrement sensibles à 3 longueurs d'onde : le vert (525 nm), le violet/bleu (440), mais également les ultra-violets (350 nm). (BOYES et al., 2020)

Une source lumineuse est un objet qui émet de la lumière, comme un lampadaire ou le soleil. Chaque source de lumière émet dans différentes longueurs d'onde qui correspondent à sa signature spectrale. Ainsi, comme l'illustre la Figure 4, la signature spectrale d'une source lumineuse dépend de sa nature ; la lumière naturelle est différente de la lumière émise par un éclairage au sodium ou par une LED.

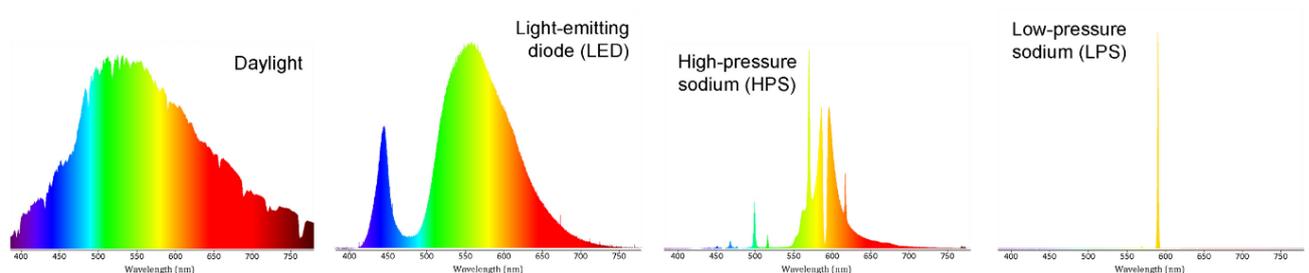


Figure 4 : signatures spectrales de différentes sources lumineuses. Source : BOYES et al., 2020

La lumière peut se caractériser par la température de sa couleur, dont l'unité de mesure est le Kelvin (K). Cette température dépend de la longueur d'onde principalement émise par la source de lumière. A titre d'exemple, une source lumineuse émettant principalement dans les longueurs d'onde 585-605 nm (identifiable dans sa signature spectrale) aura une couleur chaude (teinte orangée).

Comme l'illustre la Figure 5, une lumière « chaude » (teintes jaunes-orangées) est par convention inférieure à 3000 K, tandis qu'une lumière « froide » (teintes blanches-bleutées) est supérieure à 3000K.

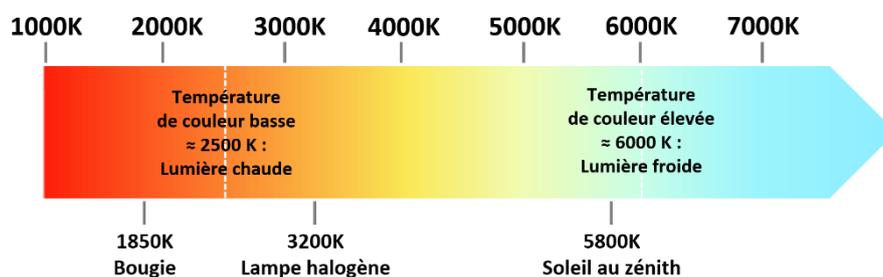


Figure 5 : échelle de température de la lumière. Source : Charlotte Angerand, basé sur ASCEN, 2019; MEB - ANPCEN, 2015; Verny & Busson, 2018

La lumière peut également se caractériser par sa diffusion dans l'atmosphère. Le phénomène de diffusion est lié à la longueur d'onde du rayonnement, ainsi qu'aux conditions atmosphériques du moment. Les longueurs d'onde les plus courtes du rayonnement solaire (le bleu) sont davantage diffusées : c'est ainsi que le ciel nous apparaît bleu.

Enfin, la lumière peut se quantifier par sa puissance, son intensité, et son éclairement :

- La puissance représente la quantité de lumière émise par une source à un instant donné. Elle peut s'exprimer en Watt lorsque l'on s'intéresse à l'ensemble du spectre lumineux, ou en Lumens lorsque l'on s'intéresse à l'œil humain (avec le spectre qu'il perçoit).
- L'intensité de la lumière s'exprime en candéla et représente la quantité de lumière émise dans une direction et perçue par l'œil humain.
- L'éclairement correspond au flux lumineux perçu par l'œil humain sur une surface éclairée d'un mètre carré. L'éclairement s'exprime en Lux.

Lux (lx) = lumens/m²

(MEB - ANPCEN, 2015)

Tableau 2 : exemples de valeurs d'éclairement (lux) de différents éléments ou situations. Source : MEB - ANPCEN, 2015; Sierro, 2019

Le Tableau 2 apporte en complément quelques exemples de valeur d'éclairement pour différentes situations.

Eclairement	Situation
0,0001 lx	Nuit naturelle sans lune, ciel nuageux
0,001 lx	Nuit naturelle sans lune, ciel dégagé
0,01 lx	Croissant de lune
0,15 lx	Pleine lune, halo au dessus d'une ville
1 lx	Bougie, clareté de l'aube/crépuscule
15 lx	Eclairage public (route ou trottoir)
50 lx	Eclairage public (carrefour)
100 lx	Eclairage d'une pièce
100000 lx	Plein soleil

L'ensemble de ces caractéristiques montrent que la lumière, en fonction de sa source, peut varier suivant de nombreux facteurs. Il est essentiel de l'avoir à l'esprit lorsqu'on étudie la pollution lumineuse car chaque facteur peut avoir des effets spécifiques sur la perte de l'obscurité, sur la biodiversité, homme inclus. Par exemple, le caractère diffus de l'ALAN peut être accentué par sa couleur : la lumière bleue pénètre 3 fois plus dans l'atmosphère que la lumière orange, et donc pollue 3 fois plus pour un éclairage équivalent (Vauclair & Kimenau, 2020).

2.1.2. Mesurer la lumière artificielle nocturne

Lorsqu'on souhaite identifier les caractéristiques d'une source lumineuse, les éléments précédemment cités peuvent être mesurés.

La mesure la plus courante d'un éclairage est celle de l'éclairement au sol. Elle est notamment utilisée pour les simulations réalisées par les professionnels de l'éclairage (Figure 6) ; elle permet une représentation des photométries au sol, c'est-à-dire les halos gradués d'éclairement autour des sources lumineuses. (Challéat, 2016)

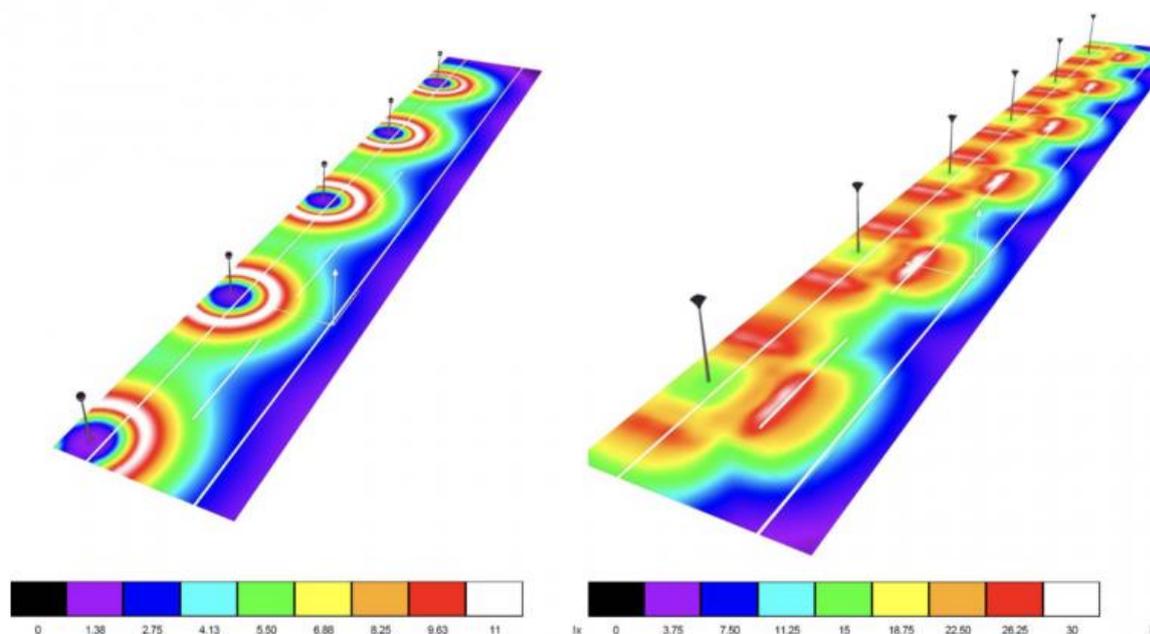


Figure 6 : modélisation de l'éclairement au sol de luminaires pour éclairage résidentiel. En Lux (lx) : modélisation réalisée sous le logiciel DIALux*, pour deux types de luminaires pour éclairage résidentiel, aux photométries différentes. Source : Challéat, 2016

Comme nous le verrons par la suite, la mesure de l'éclairement autour des sources lumineuses est nécessaire pour l'étude de la pollution lumineuse écologique qui est liée à la sur-illumination et l'éblouissement. Notons cependant que ces mesures, quantifiées en Lux, expriment une luminosité perçue par l'œil humain. La vision au sein du règne animal est très hétéroclite, et ces mesures ne prennent pas en compte toutes les longueurs d'onde perceptibles par le vivant (Longcore & Rich, 2004).

Dans le cadre des études sur la pollution lumineuse astronomique, il existe des protocoles de mesures de la lumière émise au-delà de l'horizontale, et donc vers le ciel.

On estime ainsi de façons quantitative et qualitative la lumière diffuse dans l'atmosphère (Deverchère, 2018; Deverchère et al., 2018).

Ces mesures permettent d'établir des cartes basées sur l'échelle de Bortle (Tableau 3) indiquant le niveau de luminosité du ciel nocturne (Cinzano et al., 2000; Falchi et al., 2016). L'interprétation de l'intensité lumineuse du ciel sur de telles cartes permet une estimation sur la visibilité des astres en un lieu donné. Ces cartes sont l'outil de communication et d'analyse géographique de la pollution lumineuse le plus répandu.

Ce rapport ne se penche pas directement sur ce type de pollution lumineuse, les démarches de mesure ne seront pas plus détaillées.

Tableau 3 : échelle de Bortle. Source : Deverchère et al., 2018

Couleur Bortle	Classe Bortle	Couleur Otus	Nbr étoiles visibles	Voie lactée
	1		>6700	Spectaculaire
	2		>3800	Très détaillée
	3		2170	Nombreux détails
			1180	Quelques détails
	4		950	Affaiblie à l'horizon
	4,5		660	Visible au zénith
	5		520	A peine visible
	6		340	Presque invisible
	7		220	Invisible
	8		190	Invisible
	9		<90	Invisible

Couleur Otus : couleur attribuée par le logiciel Otus pour générer les cartes de pollution lumineuse

2.2. De la lumière artificielle à la pollution lumineuse

Les premières traces de l'étude des impacts potentiels de la lumière artificielle sur la faune datent des années 1920, avec par exemple les rapports sur l'impact des régimes de lumière sur la migration des oiseaux dirigés par l'ornithologue William Rowan (Challéat, 2018, 2019). Ce n'est qu'à partir de 1956 que les premières études systématiques des impacts de l'ALAN sur la faune sont réalisées, avec démonstration de la perturbation des insectes, poissons et oiseaux (Verheijen, 1956, 1960).

En parallèle des recherches dans le domaine du vivant, l'astronomie lance la controverse sur la lumière artificielle à la fin des années 1950 aux Etats Unis. C'est à l'initiative de cette discipline que la première décision publique en faveur de la protection de la qualité du ciel nocturne a été prise en avril 1958, en adoptant une réglementation de l'éclairage public de la ville de Flagstaff en Arizona afin de protéger les activités astronomiques de l'observatoire Lowell.

Les années 1970 marquent l'arrivée de la problématique entre éclairage et astronomie sur le territoire européen (Challéat, 2018).

Les astronomes haussent le ton avec pour argument que la lumière artificielle détériore la qualité du ciel et impacte leur discipline. Ils sont entendus par les pouvoirs politiques européens qui prennent en compte cette nouvelle « pollution ». Notons cependant que les politiques de « sobriété lumineuse »

adoptées lors de cette décennie (1970) tiennent compte des dimensions économique et énergétique de la lumière artificielle mais pas de la dimension écologique. (Auricoste et al., 2018)

Les années 1980 sont marquées par l'augmentation des études sur l'impact de la lumière artificielle nocturne dans le domaine des sciences du vivant. Cette lumière est d'abord nommée « photopollution » (Verheijen, 1985, cité par Longcore & Rich, 2004), puis requalifiée de « pollution lumineuse » dans les années 1990 (Challéat, 2018), terme que nous employons encore aujourd'hui. Une multiplication des études internationales mettant en évidence les effets néfastes de l'éclairage sur le vivant s'accompagne alors de l'apparition d'associations et d'ONG en faveur de la lutte contre la pollution lumineuse. (Auricoste et al., 2018).

Les études actuelles recouvrent les deux grands axes évoqués : celui de la privation du lien au ciel nocturne étoilé et à tout ce qu'il représente (patrimoine, religion, rêve...), celui des multiples perturbations infligées au monde du vivant. Les approches de recherche sont multiples :

- Comment qualifier la lumière et la pollution lumineuse ? (Challéat, 2009; Falchi et al., 2016; Gemenne et al., 2019)
- Quel est l'impact de la lumière artificielle nocturne sur notre accès au ciel étoilé ? (Cinzano et al., 2000; Cotte & ICOMOS, 2017; Falchi et al., 2016; Marín & Jafari, 2007)
- Comment la lumière artificielle chasse l'obscurité et impacte la biodiversité ? (Challéat, 2018, 2019; Sordello, 2017a; Sordello et al., 2014; Sordello & UMS PatriNat, 2019)

2.3. Comprendre la pollution lumineuse

Depuis l'apparition du terme « pollution lumineuse » dans les années 1990, son utilisation est de plus en plus courante. Cette partie vise à éclaircir sa définition et préciser ce qu'elle représente.

Il existe plusieurs définitions de la pollution lumineuse, avec différents degrés de précision en fonction du contexte d'application.

Elle peut être définie de façon très générale comme « l'impact de la lumière artificielle sur l'environnement ; phénomène lié à l'activité humaine » (Vauclair & Kimenau, 2020). Longcore & Rich proposent une définition plus précise, en qualifiant la pollution lumineuse de « lumière artificielle qui altère le cycle naturel jour/nuit et qui, en conséquence, peut affecter les organismes vivants et leurs écosystèmes. » (Longcore & Rich, 2004). Enfin, Kobler propose en 2002 une définition opérationnelle de la pollution lumineuse : « rayonnement lumineux infrarouge, UV et visible émis à l'extérieur ou vers l'extérieur, et qui par sa direction, intensité ou qualité, peut avoir un effet nuisible ou incommode sur l'homme, sur le paysage ou les écosystèmes » (J. Siblet, 2017).

Ces définitions évoquent l'impact sur l'environnement, soit au sens large, soit plus précisément au sens de la biodiversité et des écosystèmes. L'ensemble de la communauté scientifique s'accorde sur de telles définitions.

Le terme pollution n'est cependant pas accepté et reconnu par la société entière, au contraire de la pollution de l'air ou de l'eau. Ainsi, l'AFE (Association Française de l'Eclairage) publiait en 2010 :

« La lumière ne pollue pas, la lumière est invisible ; mais elle peut générer des nuisances multiples et variées dont les effets, autant que les remèdes sont spécifiques et différents dans chaque cas. Dès que la lumière cesse, ses nuisances éventuelles disparaissent. » (AFE, 2010, cité par Challéat & Lapostolle, 2014)

Ainsi l'AFE nie les effets possibles sur les moyen et long termes. Or une pollution est considérée comme une dégradation durable d'un milieu naturel :

« Ce [les pollutions] sont les impacts qui viennent gêner ou altérer des équilibres (au niveau des écosystèmes) ou des rythmes naturels biologiques/physiologiques. Les effets ne sont pas forcément immédiats, et peuvent apparaître à moyen et long termes. » (Lazou & Kimenau, 2020)

La question est donc la suivante : peut-on parler de pollution lumineuse ? C'est-à-dire, y a-t-il des effets potentiels sur le moyen et/ou long terme ? Pour y répondre, il faut comprendre ce qui se cache derrière l'appellation « pollution lumineuse ».

La pollution lumineuse est en réalité un terme générique, et peut se décomposer en deux parties distinctes présentées sur la Figure 7 : la pollution lumineuse astronomique d'une part, et la pollution lumineuse écologique d'autre part. Elles se différencient d'abord par les phénomènes et nuisances qui les caractérisent, mais aussi par le domaine de leur(s) impact(s).

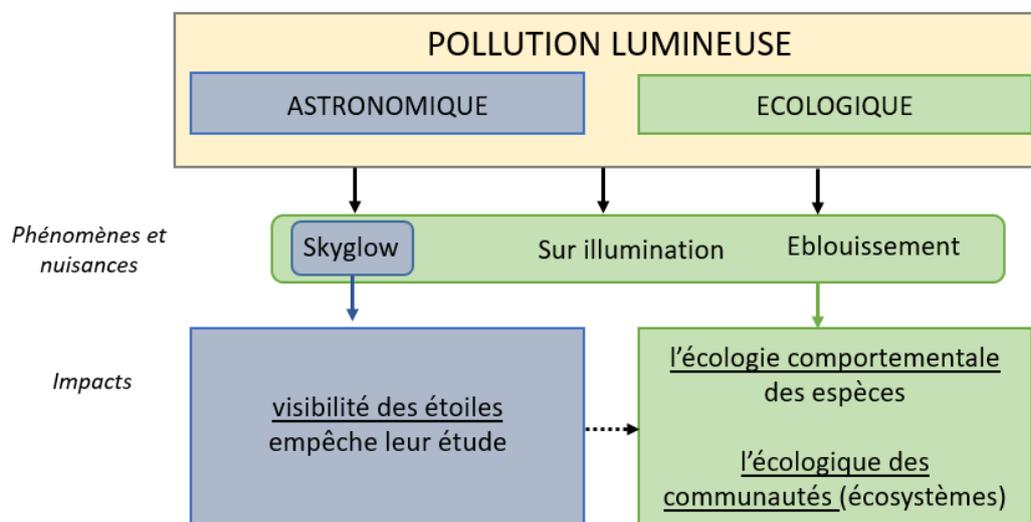


Figure 7 : Schéma explicatif de la pollution lumineuse, ses phénomènes et nuisances ainsi que ses impacts principaux. Source : Charlotte Angerand, basé sur Challéat, 2009; Longcore & Rich, 2004; J.-P. Siblet, 2008; J. Siblet, 2017

La pollution lumineuse (générale), se compose de 3 grandes catégories de phénomènes et nuisances (J. Siblet, 2017) :

- Skyglow (Figure 8a), parfois appelé luminescence du ciel nocturne (en français). Il peut être défini comme la luminosité du ciel causée par la lumière artificielle nocturne (Voigt et al., 2018). Il s'agit d'un halo lumineux ou d'une lumière nocturne ambiante créés par le réfléchissement de la lumière artificielle nocturne terrestre dans le ciel.
- Sur-illumination (Figure 8b). Elle est due à l'utilisation de luminaires à la puissance lumineuse trop élevée, excessive par rapport aux besoins anthropiques. (J. Siblet, 2017)
- Eblouissement (Figure 8c). Ce phénomène réside dans le contraste existant entre une source lumineuse et l'obscurité. Lorsque la vision s'est adaptée à l'obscurité ou la pénombre, la

confrontation à une lumière vive peut venir saturer les récepteurs du système oculaire. Pour simplifier, la juxtaposition d'une source lumineuse à l'obscurité rendra cette dernière encore plus sombre. Chez de nombreuses espèces l'éblouissement provoque une paralysie temporaire (Verny & Busson, 2018) ; ce phénomène est en grande partie responsable de leurs collisions avec les voitures la nuit.



Figure 8 : Grandes catégories de phénomènes et nuisances de la pollution lumineuse. a : Skyglow au-dessus de la ville de Strasbourg. Source : Kimenau, 2020 ; b : Illumination de Notre-Dame des Sablons à Bruxelles, Bright Brussels 2020. Source : Vivre à Bruxelles, 2020 ; c : éblouissement par des éclairages artificiels. Source : J. Siblet, 2017

Le domaine de l'astronomie subit le skyglow, donc la disparition (ou la dégradation) du ciel naturel nocturne et de la visibilité des étoiles, privant les astronomes de leurs objets d'études. La pollution lumineuse astronomique est donc un problème à grande échelle, qui résulte de l'accumulation de milliers de sources lumineuses qui illuminent le ciel. (Longcore & Rich, 2004)

Il est vraisemblable que, dans l'hypothèse où l'on éteindrait tous les éclairages d'une ville, le skyglow disparaîtrait, les étoiles et corps célestes seraient visibles. Il paraît juste de dire que, pour l'astronomie, l'éclairage n'a pas d'incidence sur le long terme : quelle que soit notre façon actuelle d'éclairer, le ciel nocturne retrouvera sa qualité quand nous éteindrions les sources de lumière artificielle. Cette hypothèse rejoint l'avis de l'AFE précédemment cité.

C'est entre autres parce que le terme de pollution lumineuse est souvent utilisé pour parler de la dégradation de la qualité du ciel étoilé vu par l'Homme (Longcore & Rich, 2004) qu'il est difficile d'appréhender les impacts possibles à long terme sur l'environnement.

Le domaine du vivant, quant à lui, subit les trois catégories de phénomènes et nuisances de la pollution lumineuse comme le montre la Figure 7. Les impacts sont dans un premier temps sur l'écologie comportementale des espèces, puis sur les communautés et écosystèmes. Ces phénomènes seront expliqués plus en détail dans la partie de ce rapport abordant la biodiversité, mais il est ici nécessaire de comprendre la signification de ces deux impacts.

Le premier impact est l'influence de la lumière artificielle sur le comportement des espèces, qui peuvent être désorientées, attirées ou repoussées par une source lumineuse. Cela peut entraîner des perturbations dans la reproduction, la migration et la communication au sein d'une même espèce.

Puis, résultant d'un effet en chaîne, le deuxième impact est la perturbation des interactions entre les espèces d'un même écosystème : on observe un changement des dynamiques de prédation et/ou de compétition. (Longcore & Rich, 2004)

L'enchaînement de ces différents effets impacte les populations et leurs relations avec leur territoire. Cela est lié à l'éclairage, cette fois-ci à l'échelle du lampadaire. Contrairement au skyglow qui résulte d'une multitude d'éclairages, l'éblouissement et la sur-illumination se retrouvent à petite échelle : un seul éclairage peut être source de perturbation.

Une fois que la répartition spatio-temporelle de la biodiversité a perdu son équilibre et que les dynamiques interspécifiques sont perturbées, l'extinction de l'ALAN ne signifie pas que la situation initiale reviendra en place. A titre d'illustration, si l'on fragmente l'environnement nocturne d'une colonie de chauve-souris par de l'éclairage, la colonie peut migrer et se trouver un nouveau territoire. L'extinction de l'éclairage ne fera pas revenir cette colonie.

La pollution lumineuse écologique a donc bien des effets sur les moyen et long termes, et doit être prise en considération. Nous verrons dans ce rapport les nombreux effets connus sur l'écologie comportementale et de communauté des espèces, mais notons déjà que les impacts en aval (sur les écosystèmes entiers) sont encore mal connus de la communauté scientifique et restent à étudier. (Challéat, 2009; Longcore & Rich, 2004).

La reconnaissance des dommages provoqués par la pollution lumineuse est grandissante : en quelques dizaines d'années la lumière artificielle est passée d'objet d'innovation et de prestige à élément de pollution à contrôler. (Challéat, 2019)

2.4. Connaissances actuelles sur le lien entre ALAN et biodiversité

Ce que nous appelons pollution lumineuse écologique résulte d'un conflit entre ALAN et biodiversité. Afin de comprendre comment ces deux éléments se confrontent et identifier les effets engendrés sur la biodiversité, il est nécessaire de comprendre la relation entre lumière et vivant.

2.4.1. Quelle biodiversité

Cette partie vise à comprendre comment l'ensemble des caractéristiques de la lumière interagit avec le monde du vivant. Si la lumière naturelle joue un rôle important pour la biodiversité, les changements spatio-temporels de la luminosité ont également des effets non négligeables : L'ALAN a de multiples impacts sur la faune et la flore (homme compris !).

Ce mémoire ne vise pas à développer les impacts sur la santé de l'homme, mais il paraît tout de même important d'évoquer les enjeux sanitaires de l'ALAN.

L'Homme est un animal diurne dont l'horloge biologique est adaptée à l'alternance jour-nuit. Bien que la société et ses « horaires » soient *un agent de synchronisation puissant* (Millet, 2005), la lumière et l'obscurité ont des rôles fondamentaux sur notre métabolisme. En effet, si l'Homme passe environ un tiers de sa vie à dormir à raison de 7 à 8 heures 30 en moyenne par nuit, c'est en grande partie grâce à l'absence de lumière, qui est inhibitrice de l'hormone du sommeil : la mélatonine (Millet, 2005). L'omniprésence de l'éclairage artificiel diminuant la quantité ainsi que la qualité de l'obscurité, c'est toute la dynamique d'éveil et de sommeil qui se retrouve perturbée, pouvant aboutir à des pathologies. Nous savons aujourd'hui qu'il y a une corrélation entre l'exposition soutenue à la lumière blanche et le développement des cancers de la prostate et du sein (Vauclair & Kimenau, 2020), mais également que les lumières blanches et bleues contribuent au diabète, aux maladies cardiaques ainsi qu'à la dépression (Sierro, 2019).

Au-delà de l'Homme, l'alternance jour-nuit est un repère environnemental fondamental pour le monde du vivant. Pour être plus exact, nous devons utiliser le pluriel : les alternances jour-nuit. Le régime de luminosité n'est pas uniforme sur le globe. L'exemple le plus parlant est la comparaison de notre régime à ceux des extrémités Nord ou Sud de la planète, où six mois de jours suivent/précèdent

six mois de nuit. Ces multiples régimes spatio-temporels naturels ont été facteurs de biodiversité, en sélectionnant les populations les plus adaptées à chaque régime de luminosité. Le développement soudain –ou du moins rapide- de l'éclairage a modifié au niveau mondial les conditions de lumière et d'obscurité, qu'il s'agisse de l'intensité, de la surface impactée, de la durée ou de la nature de la lumière. Un tel changement des conditions naturelles ne coïncide pas avec une adaptation potentielle de la biodiversité. Elle amène cette dernière sur le déclin.

2.4.1.1. Flore

S'il est connu que la végétation a besoin de lumière pour se développer, la question des effets de l'éclairage artificiel sur la végétation est peu répandue ou du moins peu médiatisée. Plusieurs études menées sur les impacts potentiels de la lumière artificielle sur la flore chlorophyllienne ont démontré l'influence de l'éclairage sur le métabolisme et le développement des plantes. (Briggs, 2002; Gaston et al., 2013; J.-P. Sibley, 2008; Verny & Busson, 2018)

Les récepteurs de la lumière des végétaux sont sensibles à certaines longueurs d'onde en particulier, comme l'illustre le Tableau 4. Ainsi il est admis que les plantes réagissent aux émissions dans les UV, le spectre du bleu, du vert, du rouge et de l'infra-rouge (Verny & Busson, 2018).

Tableau 4 : Longueurs d'onde ayant un impact avéré sur la Flore. Source : Verny & Busson, 2018

Spectre λ (nm)	Ultra-Violet < 400	Violet 400-420	Bleu 420-500	Vert 500-575	Jaune 575-585	Orange 585-605	Rouge 605-700	Infra-Rouge >700
Impacts	√	-	√	√	-	-	√	√

√ : Effets identifiés de différentes technologies d'éclairage sur plantes chlorophylliennes
 - : Absence d'information

La longueur d'onde n'est pas la seule caractéristique de la lumière qui impacte la végétation. La durée d'exposition et l'intensité de la lumière peuvent également influencer un végétal à différents stades, comme la germination, la croissance, la floraison et la sénescence (J.-P. Sibley, 2008).

Concernant la photosynthèse, le processus s'enclenche par des émissions lumineuses dans les infrarouges et les ultraviolets (deux pics présents dans le spectre de la lumière naturelle). La lumière vert bleutée améliore la croissance du végétal lorsqu'elle s'y ajoute. (Verny & Busson, 2018)

Cela signifie que la lumière artificielle, à condition d'émettre dans les ondes présentées sur le Tableau 4, perturbe le cycle de vie naturel de la flore. L'information sur la durée de luminosité est interprétée par les plantes vasculaires afin de se situer dans l'évolution journalière ainsi que la saison. La modification de la durée de lumière disponible pour de telles plantes perturbe et décale leur cycle de vie. La durée de lumière perçue par le végétal peut influencer –par exemple- la période et/ou le moment de floraison. Une étude de 2018 prouve le lien entre l'éclairage urbain et le retard de la chute des feuilles chez les arbres (Verny & Busson, 2018).

L'ALAN peut également avoir un impact sur d'autres espèces, elles-mêmes dépendantes de l'individu « perturbé ». Ainsi, comme le présente l'étude de l'impact de la lumière artificielle sur le débourrement des arbres caducs au Royaume Uni (French-Constant et al., 2016), l'ALAN peut provoquer un débourrement précoce de certains arbres et, dans un effet en chaîne, priver de ressources alimentaires les chenilles se nourrissant à l'origine de leurs bourgeons.

Dans ce même esprit de perturbation des relations faune-flore, la végétation peut subir les effets de l'ALAN indirectement, cette dernière atteignant dans un premier temps les pollinisateurs nocturnes (Knop et al., 2017; Macgregor et al., 2017), et dans un second temps la flore nécessitant une pollinisation. (Verny & Busson, 2018)

2.4.1.2. Faune

En 2015, des auteurs placent la pollution lumineuse telle « l'une des pressions de sélection les plus importantes qui s'exercent sur la biodiversité » (Swaddle et al., 2015; Urbanski et al., 2012, cité par Sordello, 2017). Cela peut être appuyé par la multiplicité des impacts connus de l'ALAN sur la faune ; on estime que 60% des invertébrés et 30% des vertébrés sont nocturnes (Hölker et al., 2010) et donc directement impactés par l'éclairage artificiel.

La lumière influence les rythmes biologiques, la physiologie et le comportement des espèces vivantes. Un changement du régime spatio-temporel de luminosité peut donc avoir des impacts écologiques et physiologiques importants. (J. Sibley, 2017)

Cette partie vise à résumer les différents phénomènes identifiés sur la faune, tels que la désorientation, l'attraction et la répulsion dans un premier temps, puis les changements de prédation et de compétition.

La lumière artificielle nocturne, qu'il s'agisse du skyglow, de la sur-illumination ou de l'éblouissement, influence la faune. Comme le montre la Figure 9, il y a deux catégories d'impacts : les impacts directs sur l'écologie comportementale des espèces, les impacts indirects sur l'écologie des communautés et des écosystèmes.

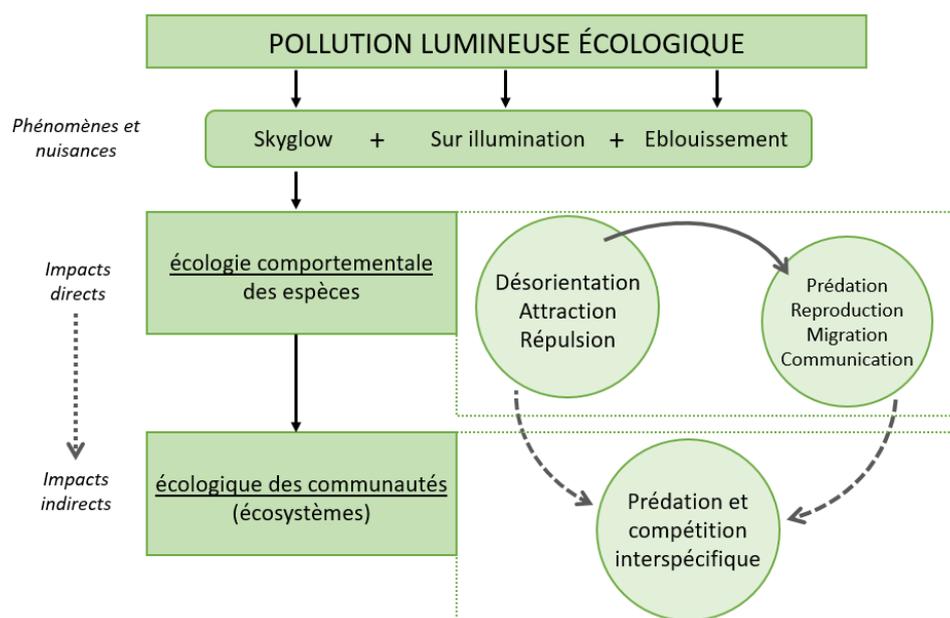


Figure 9 : schéma explicatif de la pollution lumineuse écologique. Source : Charlotte Angerand, basé sur Challéat, 2009; Longcore & Rich, 2004; J.-P. Sibley, 2008; J. Sibley, 2017

On entend par « communauté » un ensemble d'espèces interagissant dans un même milieu, et par « écosystème » l'ensemble formé par une communauté et le milieu avec lequel elle interagit.

Le premier impact sur la faune concerne la désorientation de certaines espèces, ainsi que les phénomènes d'attraction et de répulsion (Figure 9). La désorientation est due à une illumination ambiante et à l'altération de la visibilité du ciel étoilé par la diffusion de la lumière dans l'atmosphère. Les phénomènes d'attraction et/ou répulsion sont quant à eux dus à des sources lumineuses unitaires (l'éclairage à l'unité). (Challéat, 2009) Notons que lorsque la lumière a un rôle attractif sur une espèce, on parle de phototaxie positive, et de phototaxie négative pour un rôle répulsif. Ces trois éléments peuvent eux même perturber, en aval, la prédation, la reproduction, la migration et la communication au sein des espèces.

Les oiseaux sont bien représentatifs du phénomène de désorientation lié à la pollution lumineuse. En effet, parmi les oiseaux migrateurs, la majorité se déplace la nuit. Une partie d'entre eux se repèrent grâce aux étoiles. La pollution lumineuse diminuant leur visibilité, ces oiseaux peuvent être désorientés ; cela les mène à un épuisement, puis à la mort. Cela peut notamment s'observer chez certaines espèces de canards et de passereaux. (J. Siblet, 2017)

Le phénomène de désorientation est aussi provoqué par la présence de points lumineux artificiels qui peuvent être confondus avec des astres lors des migrations et aboutir à un épuisement ou à des collisions avec des bâtiments, provoquant la mort (J. Siblet, 2017). Notons également que les individus désorientés et épuisés sont plus vulnérables en plein jour, et deviennent des proies faciles.

Les insectes illustrent quant à eux la problématique de l'attraction de la lumière. D'une façon générale, les insectes sont particulièrement concernés par la problématique de la lumière artificielle. En 2001, Eisenbeis estimait qu'un tiers des insectes approchant les luminaires étaient pris au piège ; une lampe à mercure haute pression attirant environ 450 insectes par nuit en tuerait 150 de l'exposition à la prédation et d'épuisement (Eisenbeis & Hänel, 2009). L'auteur a également mis en avant dans ses travaux le lien entre le type d'éclairage, sa signature spectrale et le nombre d'insectes piégés, concluant que les lampes Sodium Basse Pression sont les moins nuisibles. L'ALAN serait alors la deuxième source de disparition des insectes après les pesticides (Kimenau, 2020).

Les trois ordres d'insectes les plus affectés par l'attraction de la lumière artificielle sont les Diptères (représentant 48% des insectes attirés), les Coléoptères (11%), ainsi que les Lépidoptères (11%). Les études concernant les insectes et la lumière artificielle portent en majorité sur les papillons de nuit car les données disponibles en Europe sont nombreuses. Cela s'explique par un grand nombre d'espèces dans ce groupe, dont les évolutions et écologies sont diverses, ainsi que par la représentativité des lépidoptères dans les invertébrés nocturnes – environ 85% (BOYES et al., 2020)

Concernant les impacts sur la reproduction et la communication, les lucioles ou vers luisants sont un exemple parlant. Les lucioles utilisent la bioluminescence pour communiquer, c'est-à-dire qu'elles produisent elles-mêmes de la lumière. Pour que les individus de cette espèce puissent communiquer, l'obscurité est nécessaire (J. Siblet, 2017). L'illumination ambiante désoriente les lucioles qui ne sont plus capables de distinguer les signaux lumineux émis par leur espèce. L'ALAN met alors en péril la communication intra-spécifique des lucioles - indispensable à leur reproduction - et par conséquent leur pérennité.

La répulsion est un phénomène qui s’observe surtout chez les mammifères. Ce groupe est cependant peu représenté dans les études d’impacts de l’ALAN qui s’intéressent plus aux oiseaux, insectes et reptiles (Beier, 2006), à l’exception des chauves-souris qui sont récemment devenues l’emblème de la faune nocturne à protéger.

Les mammifères ne sont pourtant pas épargnés par la problématique de l’ALAN :

« Toutes les 986 espèces de chauves-souris, les blaireaux ainsi que la plupart des petits carnivores et la plupart de rongeurs (à l’exception des écureuils), 20% des primates, et 80% des marsupiaux sont nocturnes, et bien plus encore sont actifs autant le jour que la nuit ». (Walls, 1942, as cited in Beier, 2006)

Nous détaillerons ici uniquement l’impact de l’ALAN sur les chiroptères, car les chauves-souris sont les *espèces parapluies*³ nocturnes les plus étudiées dans la littérature scientifique. Notons que les chiroptères sont inscrits comme indicateurs de suivi par l’Association Française pour la Biodiversité (AFB) (Auricoste et al., 2018).

La répulsion des chiroptères à la lumière est dans un premier temps dû à la protection que leur offre l’obscurité : cela leur permet de limiter le danger lié aux prédateurs diurnes. Certaines espèces de chiroptères insectivores utilisent tout de même la lumière artificielle pour se nourrir (Russo et al., 2019) car comme nous l’avons vu, les éclairages peuvent attirer un grand nombre d’insectes. Elles se mettent alors en danger vis-à-vis de leurs propres prédateurs. Ce type de comportement opportuniste est peu courant chez les chiroptères mais peut impacter d’autres espèces repoussées par la lumière en changeant la dynamique de compétition pour la nourriture. Cela peut aboutir à l’extinction des espèces les plus sensibles à l’ALAN.

L’opportunisme et la répulsion dépendent de l’espèce concernée (certaines étant *lucifuges*⁴, d’autres tolérantes à l’ALAN), mais également du contexte. Ainsi, comme le montre la Figure 10, les situations où les chiroptères sont les plus vulnérables (maternage et désaltération), nécessitent plus d’obscurité y compris pour les chauves-souris tolérantes à la lumière. (Russo et al., 2019; Voigt et al., 2018).

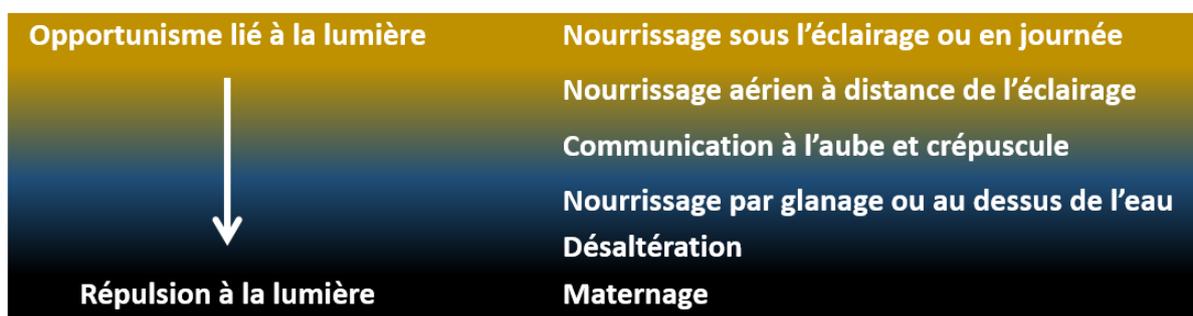


Figure 10 : réponses des chiroptères face à la lumière pour différentes situations. Source : Charlotte Angerand, traduit de Voigt et al., 2018

La lumière artificielle nocturne réduit donc le territoire disponible pour les chiroptères, c’est une cause de fragmentation (spatio-temporelle) du paysage nocturne. De manière générale, l’ALAN impacte les chiroptères dans leur communication, le choix de leurs sites de nidification et de nourrissage (Russo et al., 2019).

*Espèce parapluie*³ : une espèce dont la conservation confère une protection à un grand nombre d’espèces co-existantes naturellement. (Roberge & Angelstam, 2004)

*Lucifuge*⁴ : qui fuit la lumière.

Si l'on s'intéresse aux différentes espèces de chiroptères, des études précisent leurs réactions face à la lumière artificielle. Ainsi, nous savons que *Rhinolophus sp.* et *Myotis sp.* sont impactées négativement par l'illumination des haies et berges à proximité de leurs colonies, tandis que *Pipistrellus sp.* et *Nyctalus sp.* peuvent localement bénéficier de l'ALAN qui leur fournit de nouveaux sites de nourrissage (Laforge et al., 2019). Le Tableau 5 précise l'état des connaissances pour les espèces de chauves-souris présentes sur le territoire de Belgique.

Tableau 5. Espèces de chiroptères présentes sur le territoire de Belgique selon leur sensibilité connue à la lumière. Source : Charlotte Angerand, basé sur Nugroho, 2013; Plecotus, n.d.

Espèces lucifuges	Espèces partiellement tolérantes à la lumière	Inconnu
Petit rhinolophe (<i>Rhinolophus hipposideros</i>)	Barbastelle d'Europe (<i>Barbastellus barbastella</i>)	Pipistrelle de Nathusius (<i>Pipistrellus nathusii</i>)
Grand rhinolophe (<i>Rhinolophus ferrumequinum</i>)	Pipistrelle commune (<i>Pipistrellus pipistrellus</i>)	Grande noctule (<i>Nyctalus lasiopterus</i>)
Grand murin (<i>Myotis myotis</i>)	Pipistrelle de Kuhl (<i>Pipistrellus kuhlii</i>)	Murin de Brandt (<i>Myotis brandtii</i>)
Murin de Daubenton (<i>Myotis daubentonii</i>)	Pipistrelle pygmée (<i>Pipistrellus pygmaeus</i>)	Murin à oreilles échanquées (<i>Myotis emarginatus</i>)
Murin de Bechstein (<i>Myotis bechsteinii</i>)	Sérotine commune (<i>Eptesicus serotinus</i>)	
Murin de Natterer (<i>Myotis nattereri</i>)	Sérotine bicolor (<i>Vespertilio murinus</i>)	
Oreillard gris (<i>Plecotus austriacus</i>)	Noctule commune (<i>Nyctalus noctula</i>)	
Oreillard roux (<i>Plecotus auritus</i>)		
Noctule de Leisler (<i>Nyctalus leisleri</i>)		

Les espèces tolérantes à la lumière se retrouvent dans une multitude d'habitats, parfois à proximité des espaces fortement urbanisés, tandis que les espèces lucifuges sont en majorité des espèces forestières. (Lewanzik & Voigt, 2017; Russo et al., 2019)

Pour conclure cette partie sur la faune, précisons que l'ensemble des comportements précédemment cités vont, en aval, impacter l'écologie de communauté. Cela signifie que les relations interspécifiques vont être perturbées, comme la prédation et la compétition (Challéat, 2009; Longcore & Rich, 2004). Il a, par exemple, été mis en évidence que l'ALAN provoque une augmentation du risque que les petits herbivores nocturnes se fassent tuer par un prédateur (Beier, 2006).

La perturbation de l'écologie des communautés, en modifiant les équilibres entre les espèces présentes, finit par impacter les écosystèmes. Les effets concrets de la pollution lumineuse à une telle échelle sont aujourd'hui difficilement appréhendables. Ainsi, l'ampleur réelle des impacts reste à étudier (Challéat, 2009; Longcore & Rich, 2004).

2.4.2. Quelle lumière

Les 4 variables de l'éclairage : le spectre lumineux, l'intensité, la direction de la lumière (Schroer & Hölker, 2016) ainsi que la durée de l'éclairage (Longcore, 2018) influencent la fragmentation spatio-temporelle de l'environnement nocturne.

Comme nous allons l'illustrer, chacune de ces variables impacte le vivant.

Le monde du vivant se compose d'une multitude d'espèces, et elles ne perçoivent pas toutes la lumière de la même façon. De nombreuses études ont été menées sur les impacts du spectre lumineux sur la faune et la flore. Des méta-analyses récentes synthétisent les connaissances actuelles sur l'influence (ou non) sur un taxon de chaque longueur d'onde (MEB - ANPCEN, 2015; Schroer & Hölker, 2016; Verny & Busson, 2018). La compilation des données présentées dans ces études se trouve dans le Tableau 6. Notons que les effets remarquables sur les différents taxons sont en majorité liés aux petites longueurs

d'onde, allant de l'ultra-violet au vert. Cependant, l'absence d'effets remarquables ne signifie pas que ces taxons ne sont pas influencés par ces longueurs d'onde, seulement que la recherche ne l'a pas prouvé.

Tableau 6 : Longueurs d'onde ayant un impact avéré sur le monde du vivant. Source : Charlotte Angerand, basé sur MEB - ANPCEN, 2015; Schroer & Hölker, 2016; VERNY & BUSSON, 2018

Longueur d'onde λ (nm)	Ultra-Violet < 400	Violet 400-420	Bleu 420-500	Vert 500-575	Jaune 575-585	Orange 585-605	Rouge 605-700	Infra-Rouge >700
Oiseaux	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
Mammifères (hors chiroptères)	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	-
Chiroptères	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-
Insectes	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-
Amphibiens et reptiles	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Poissons	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
Plantes chlorophylliennes	✓	-	✓	✓	-	-	✓	✓

✓ : Effets identifiés de différentes technologies d'éclairage sur les taxons

- : Absence d'information

Les données présentées permettent d'estimer l'impact des différents types d'éclairage que nous utilisons en comparant leurs signatures spectrales aux longueurs d'onde perturbant la faune et la flore.

Le lien entre l'intensité lumineuse et le monde du vivant est rarement évoqué dans la littérature. Les espèces nocturnes sont particulièrement sensibles à la lumière, et sont pour la plupart déjà influencées par les phases lunaires (Sordello, 2017a). Le constat principal est que la lumière artificielle la plus infime au-delà du seuil naturel (jusqu'à 0,15 lux par pleine lune), influence la faune et la flore.

Les études sur les chiroptères, dans l'ensemble plus approfondies que pour le reste de la faune, précisent tout de même les seuils clés de l'intensité lumineuse. Ainsi nous savons aujourd'hui qu'un éclairage supérieur à 10 lux créé un obstacle pour les chauves-souris, y compris chez les espèces les plus tolérantes à la lumière (Halle et al., 2014, 2015, cité par Mission Economie de la Biodiversité et al., 2015).

Une étude sur les papillons de nuit de 1983 a mis en avant une perturbation notable des individus au-delà de 2 lux (Riley et al., 1983 cité par Schroer & Hölker, 2016).

L'impact de l'intensité de la lumière a également été étudié sur le monde végétal. Bien que le seuil « critique » d'intensité lumineuse dépende fortement de l'espèce végétale concernée, il a été constaté que pour une lumière émise dans les longueurs d'onde de sensibilité maximale d'une plante, l'intensité peut influencer des réactions photopériodiques à partir de 0,1 lux (Bünning and Moser, 1969, cité par Schroer & Hölker, 2016). Néanmoins, d'autres études ont montré que le seuil d'intensité pour observer un impact sur la flore est de 10 lux (Matzke, 1936, Bennie et al., 2015, cités par Schroer & Hölker, 2016), si l'on ne prend pas en considération le spectre d'émission des sources lumineuses.

La durée et les horaires de l'éclairage influencent la dimension temporelle de la fragmentation du territoire nocturne. Ainsi, un éclairage prolongé réduit l'espace disponible des espèces nocturnes. Il a également été observé un prolongement de l'activité d'espèces diurnes, venant chevaucher les horaires d'espèces nocturnes, alors que leurs niches temporelles sont normalement distinctes (Sordello, 2017a). De plus, s'il paraît qu'une extinction de l'éclairage peut défragmenter le territoire, il est important de prendre en compte les horaires d'activité des espèces nocturnes. Une partie de ces espèces n'ont pas leur pic d'activité en cœur de nuit, mais au crépuscule et/ou à l'aube (MEB - ANPCEN, 2015).

La variable de direction de l'éclairage correspond à la dimension spatiale, elle influence l'emprise spatiale d'une source lumineuse.

L'ensemble de ces quatre variables doit être pris en compte afin d'éclairer de manière judicieuse le territoire, et éviter au maximum les effets néfastes sur la biodiversité.

Il existe des guides de bonnes pratiques pour accompagner la mise en place d'un éclairage « juste ». Nous y reviendrons dans ce rapport.

2.4.3. Polémique autour des LEDs

L'apparition des LEDs sur le marché est assez récente mais couvre tout l'éclairage, de la rue à nos lampes de bureau. Les arguments avancés pour cette transition sont que les LEDs durent plus longtemps que les autres lampes et que leur consommation énergétique est inférieure à celle des éclairages traditionnels. (Kimenau, 2020)

Ces arguments font que de nombreux élus optent pour cette nouvelle technologie lors de la maintenance des éclairages publics actuels. Cependant, la lumière émise a une signature spectrale qui se distingue de celle des éclairages traditionnels : une LED émet une lumière polychromatique avec des longueurs d'onde dans le bleu (Figure 11). Comme nous l'avons vu précédemment, ces petites longueurs d'onde ont un impact assez large sur la biodiversité, homme inclus.

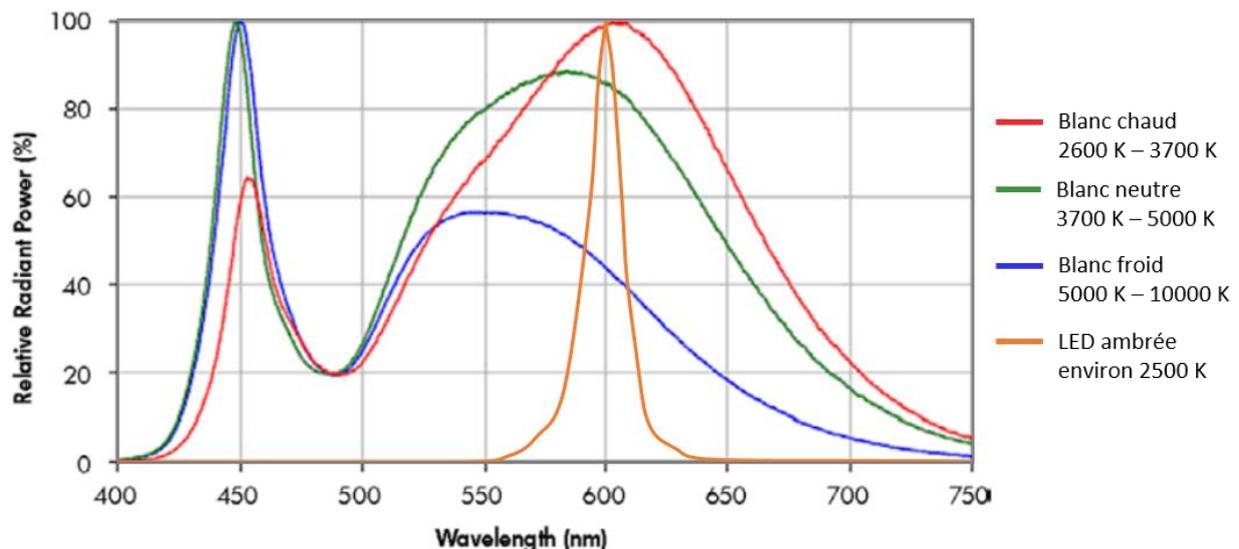


Figure 11 : Comparaison des spectres énergétiques de différentes sources LEDs (LEDs blanches et ambrée). Source : Charlotte Angerand, basé www.LED-FR.net et Innolumis cités par Verny & Busson, 2018

Les études d'impacts des LEDs sur la biodiversité sont peu nombreuses, et non unanimes quant aux résultats.

Une étude de 2011 sur la relation entre insectes et LEDs affirme que cette nouvelle technologie attire moins d'individus que les anciennes ampoules (Eisenbeis et Eick, 2011, cités par MEB - ANPCEN, 2015). Au contraire, une étude de 2014 conclut que les LEDs capturent environ 48 fois plus d'invertébrés volants que les éclairages traditionnels tels que les lampes Sodium Haute Pression (Pawson & Bader, 2014).

Concernant les chiroptères, les résultats sont également mitigés.

Il apparaît dans une étude de 2016 que l'impact des LEDs est similaire à celui des éclairages Sodium Haute Pression (également polychromatiques mais avec peu d'émissions bleues). Cette conclusion s'applique aux espèces tolérantes à la lumière telles que les *Pipistrellus sp.*, *Eptesicus sp.*, *Nyctalus sp.* et *Vespertillo sp.*, ainsi qu'aux espèces lucifuges telles que *Myotis sp.*, *Rhinolophus sp.*, et *Plecotus sp.* (Rowse et al., 2016). Une étude britannique a montré une tendance différente, présentant une répulsion plus marquée des *Rhinolophus sp.*, *Myotis sp.* et *Plecotus sp.* vis-à-vis des LEDs (Stone et al., 2012).

Les connaissances des impacts des LEDs sur la biodiversité sont encore aujourd'hui très superficielles, et nous n'avons pas le recul nécessaire pour affirmer que cette nouvelle technologie n'est pas dommageable pour le monde vivant. (Anses, 2019; Lewanzik & Voigt, 2017)

Ce point a provoqué une levée de boucliers du corps scientifique, mettant en garde contre de tels éclairages. Malgré tout, le nombre LEDs se multiplie au niveau mondial. Leur efficacité étant élevée et leur coût moindre, un phénomène de surconsommation de l'éclairage, induit par les LEDs, s'observe aujourd'hui (Longcore, 2018).

Récemment la LED ambrée a fait son apparition sur le marché (3000 K), telle que celle utilisée sur le territoire de Sherbrooke au Canada (Aubé & Kimenau, 2020). Cette nouvelle technologie possède un spectre monochromatique, et émet donc moins de bleu que les LEDs standards tout en permettant des économies en termes énergétiques. Elles apparaissent donc comme le juste mélange entre les lampes Sodium que nous remplaçons aujourd'hui et la technologie LED. (Kimenau, 2020)

De plus, la technologie LED permet une gestion précise de l'énergie et de la quantité de lumière respectivement consommée et fournie en un lieu donné (Challéat, 2019). L'utilisation de LEDs pour l'éclairage public est d'ailleurs souvent accompagnée d'un *dimming*⁴ : c'est une diminution contrôlée et précise de la puissance et du flux lumineux. Cela est rendu possible grâce à la relation linéaire entre la puissance et le flux lumineux d'une LED, ce qui n'est pas le cas avec les éclairages traditionnels (Figure 12)

Le dimming est notamment utilisé pour diminuer l'intensité d'éclairage en cœur de nuit (aux alentours de minuit), lorsque les utilisateurs de l'espace public sont moins nombreux. Cette démarche n'est cependant pas synchronisée avec le pic d'activité des chiroptères et de nombreuses autres espèces nocturnes et crépusculaires (Gaston et al., 2012; Lacoëuilhe et al., 2014).

Sodium Haute Pression (SHP)
Courbe non linéaire

Puissance	Flux lumineux
100 %	100 %
75 %	63 %
50 %	30 %
0 %	Arrêt du système

LED, courbe linéaire

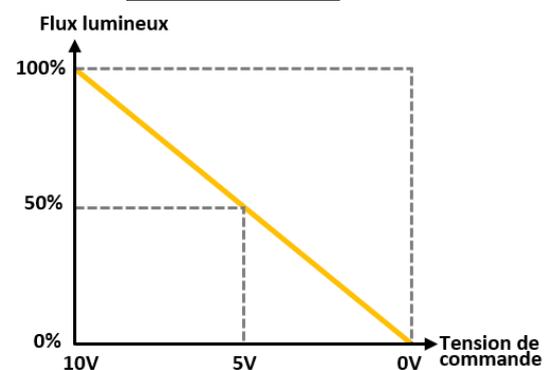


Figure 12 : Evolution du flux lumineux en cas de réduction de l'alimentation énergétique. Comparaison d'un éclairage traditionnel (SHP) et d'une LED. Source : Verny & Busson, 2018

*dimming*⁴ : variation du flux lumineux sur une plage horaire définie

La polémique autour des LEDs est donc justifiée car sans une bonne connaissance de cette technologie, un remplacement de l'éclairage peut aboutir à une croissance de la pollution lumineuse écologique. De plus, un phénomène de surconsommation des LEDs s'observe, dû aux économies qu'elles génèrent. Cependant, si la LED est intelligemment utilisée, tant au niveau de son spectre qu'en termes de quantité, elle peut être un allié important pour la lutte contre la pollution lumineuse.

3. Gestions et protections de la nuit

- « - *Il fait nuit ?*
- *Ça dépend.*
- *Ça dépend de quoi ?*
- *De nous. »*

Eugène Guillevic, « Dialogues »,
Etier, 1979.

La pollution lumineuse est une problématique globale dont la compréhension et la reconnaissance croissent internationalement. Lutter contre cette pollution est un enjeu actuel qui se traduit par la densification d'une coalition de cause mondiale et qui, de manière grossière, s'illustre par la devise « éclairer juste ». Mais si cette devise s'impose petit à petit comme un dictat, les motivations premières des politiques restent le besoin de dépenser moins tant énergiquement que financièrement (Challéat, 2019). La lutte contre la pollution lumineuse est par conséquent, aujourd'hui, un effet de la lutte contre les dépenses inutiles plutôt qu'un but à part entière.

Ce manque d'intérêt est en partie compensé par les avancées de la recherche sur la lumière et le vivant, l'émergence de mouvements indépendants de lutte contre la pollution lumineuse, ainsi que la mise en place de démarches engagées à différentes échelles du territoire.

Cette partie vise à mettre en avant l'état de reconnaissance de la nuit – obscurité et ciel étoilé – dans la littérature, vis-à-vis du patrimoine mondial et d'un point de vue législatif. Nous verrons ensuite les guides et actions plus concrets appliqués au territoire dans un but de protection de l'obscurité.

3.1. La nuit est une ressource

Le premier atlas mondial de la clarté artificielle du ciel nocturne évoque les effets néfastes de la lumière artificielle en énumérant les apports pluridisciplinaires d'un ciel nocturne de qualité :

« Le ciel nocturne, qui constitue le panorama de l'Univers environnant, a toujours eu une forte influence sur la pensée et la culture humaines, de la philosophie à la religion, de l'art à la littérature en passant par la science. » (Cinzano et al., 2000)

Samuel Challéat appuie le propos, comme nous l'avons vu dans la partie « 1.1 Définir la nuit », en assimilant la perte d'obscurité à ce que l'on retrouve dans la littérature scientifique de la conservation sous le nom de *l'extinction de l'expérience de la nature* : « [...] la pollution lumineuse raréfie nos opportunités de relation visuelle directe avec cette inépuisable ressource historique, littéraire, philosophique, religieuse, paysagère ou encore artistique qui participe à notre individuation, de la constitution de notre être, de notre rapport à l'Autre et au monde vivant » (Challéat, 2019).

Cette vision des apports d'un ciel nocturne naturel (de qualité) est soutenue par l'hypothèse de la biophilie. Cette hypothèse est avancée par la littérature étudiant la relation entre l'Homme et la nature, ainsi que tous les bénéfices qu'il peut en tirer. La méta-analyse *What are the benefits of Interacting with Nature ?* (Keniger et al., 2013) met en avant l'importance de la protection des ressources naturelles qui, mises en danger par l'anthropocène, menacent la qualité de vie humaine au fil de leurs détériorations. Le contact avec la nature (indirect, incident ou intentionnel) aurait des

bénéfices multiples au bien-être humain et à son épanouissement en tant qu'individu, mais l'inciterait également à préserver cet environnement qui lui est favorable.

Se pencher sur la question de l'éclairage, et plus précisément de comment l'éclairage « juste » paraît alors indispensable : cela pourrait améliorer la qualité de la nuit, entité de nature spatialement omniprésente, et offrir à de nombreux êtres humains un contact avec la nature qu'ils avaient perdu, si ce n'est jamais eu.

C'est dans cet état d'esprit que nous retrouvons de plus en plus d'ouvrages sur la considération de la nuit comme une ressource. Nous citerons ici Samuel Challéat et son ouvrage *sauver la nuit* (2019) avec la proposition de l'obscurité comme une ressource nécessaire au monde vivant, ainsi que Terrel Gallaway (2015) et son approche de la valeur du ciel nocturne. Ce dernier conclut sur l'importance de l'impact positif d'un accès au ciel nocturne de qualité, notamment sur le bien-être et le bonheur durable qu'il procure aux populations.

3.2. Patrimoine mondial, UNESCO et réserves étoilées

En 1992, lors de la convention de Rio, l'UNESCO intervient : « Le ciel étoilé fait partie intégrante du patrimoine mondial à préserver », reconnaissant internationalement sa valeur en tant qu'héritage à transmettre aux futures générations (d'après la définition du patrimoine mondial de l'UNESCO).

En 2007, un *mouvement international pour la défense du ciel nocturne et le droit à la lumière des étoiles* est initié lors de la conférence de La Palma : Starlight. Ce mouvement rassemble de nombreux acteurs à portée internationale : l'UNESCO, l'Organisation Mondiale du Tourisme (OMT), l'Union Astronomique Internationale (IAU), la Convention pour la conservation des espèces migratrices et des espèces sauvages du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE- CMS), la Commission Européenne (CE), le Secrétariat de la Convention sur la Diversité Biologique (SCDB), le Conseil de l'Europe (COE), le Programme de l'UNESCO sur l'Homme et la biosphère (MaB) et la Convention de Ramsar (Marín & Jafari, 2007).

La conférence de La Palma aboutit à la *déclaration Starlight*, qui demande un accord entre l'UNESCO, *Astronomie et patrimoine mondial* et *Starlight* dans le but de définir et concrétiser le concept de « Réserve Starlight » (site exceptionnel de paysage nocturne). C'est en 2009 qu'est publiée l'avancée du mouvement, définissant le concept de la manière suivante :

« Une Réserve Starlight est un site où un engagement à défendre la qualité du ciel nocturne et l'accès à la lumière des étoiles a été mis en place. Sa fonction principale sera de préserver la qualité du ciel nocturne et de ses valeurs associées, qu'elles soient culturelles, scientifiques, astronomiques, ou les paysages s'y rapportant » (Marín, 2009)

Un concept de « réserve nocturne » est également développé et reconnu au niveau mondial par la International Dark Sky Association (IDA), qui crée en 2001 un programme nommé *International Dark Sky Places* afin de mettre en avant les espaces au ciel nocturne (et à sa gestion) remarquable. Ce programme distingue cinq types d'espaces : International Dark Sky Communities, Parks, Reserves, Sanctuaries ainsi que les Urban Night Sky Places. (International Dark Sky Association, 2014)

Le Comité du Patrimoine mondial de l'UNESCO ne peut cependant pas reconnaître les réserves Starlight et parcs Dark Sky comme bien culturels et naturels du patrimoine mondial pour leur inscription à la Liste du Patrimoine mondial, car il n'existe pas encore de critères de considération les concernant dans la Convention du patrimoine mondial (UNESCO, 2020).

Cela signifie que le ciel ne peut être considéré dans le cadre de la Convention du patrimoine mondial.

Le ciel n'a pas à lui seul une valeur universelle exceptionnelle, il est nécessaire de mettre à l'étude son contexte. Ainsi, le label Dark sky vient soutenir les autres caractéristiques du patrimoine astronomique (et archéo-astronomique). (Cotte & ICOMOS, 2017)

3.3. Législation, état des lieux européens et cas belge

Définir et quantifier sont deux étapes essentielles pour la prise en compte d'une pollution dans la loi. La pollution lumineuse est une notion difficile à appréhender, tant par ses aspects techniques que par la multiplicité de ses impacts encore mal connus. De plus, la pollution lumineuse astronomique impacte le ciel nocturne qui n'est pas reconnu comme un objet de droit. Cela se traduit par une difficulté à mettre en place un cadre réglementaire précis et pertinent aux échelles mondiale, européenne, et nationales. (Aujollet & David, 2014)

Les premières dénonciations des effets néfastes de l'ALAN appartiennent au domaine de l'astronomie. C'est à l'initiative de cette discipline que la première décision publique en faveur de la protection de la qualité du ciel nocturne a été prise aux Etats-Unis en avril 1958, en adoptant une réglementation de l'éclairage public de la ville de Flagstaff en Arizona afin de protéger les activités astronomiques de l'observatoire Lowell (Challéat, 2018).

En Europe il n'existe pas encore de règlement visant directement la lutte contre la pollution lumineuse. Cette pollution est cependant abordée dans des règlements et directives visant l'écoconception des sources lumineuses par rapport à un ensemble de problématiques économiques, techniques et environnementales. L'un des derniers textes parus est le règlement (UE) 2019/2020 qui entrera en application le 1er septembre 2021 (Commission européenne, 2019).

Différents pays ou régions d'Europe se sont tout de même aidés de lois pour protéger le ciel étoilé et l'obscurité nocturne dès la fin du XXème siècle. Ainsi, en 1998 la Catalogne (Espagne) adopte une loi pour la protection de l'environnement nocturne, suivie en 2001 d'une loi pour protéger les ambiances nocturnes. L'année suivante, la Tchéquie devient pionnière européenne avec une loi sur la protection du ciel nocturne et de l'air, visant directement la pollution lumineuse (Meynier, 2008). Cette démarche est ensuite suivie par la Slovaquie.

En 2007, la France légifère pour la première fois sur la notion de pollution lumineuse. Les lois Grenelle I de 2009, puis Grenelle II de 2010 visent « Les émissions de lumière artificielle de nature à présenter des dangers ou à causer un trouble excessif aux personnes, à la faune, à la flore ou aux écosystèmes, entraînant un gaspillage énergétique ou empêchant l'observation du ciel nocturne feront l'objet de mesures de prévention, de suppression ou de limitation. » (LOI N° 2009-967 Du 3 Août 2009 de Programmation Relative à La Mise En Œuvre Du Grenelle de l'environnement (1), 2009). Suivent des décrets d'application en 2011 (n°2011-831) et 2012 (n°2012-218) et un arrêté en 2013 visant à limiter les nuisances lumineuses. Ces textes énoncent des consignes d'extinction pour les enseignes et publicités extérieures sur certaines plages horaires nocturnes, ainsi que pour les vitrines, façades et bureaux.

Cependant le manque d'application réel de la loi pousse en 2017 l'ANPCEN à déposer un recours devant le conseil d'Etat. Ce recours dénonce l'inaction à l'échelle du pays.

Enfin, en 2018 un arrêté sur les nuisances lumineuses est publié pour compléter les indications de mises en œuvre de l'éclairage. Cet arrêté présente des plages horaires d'extinction ainsi que des recommandations techniques concernant l'orientation de la lumière (Figure 13) et sa température en Kelvin (ASCEN, 2019; Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2019).

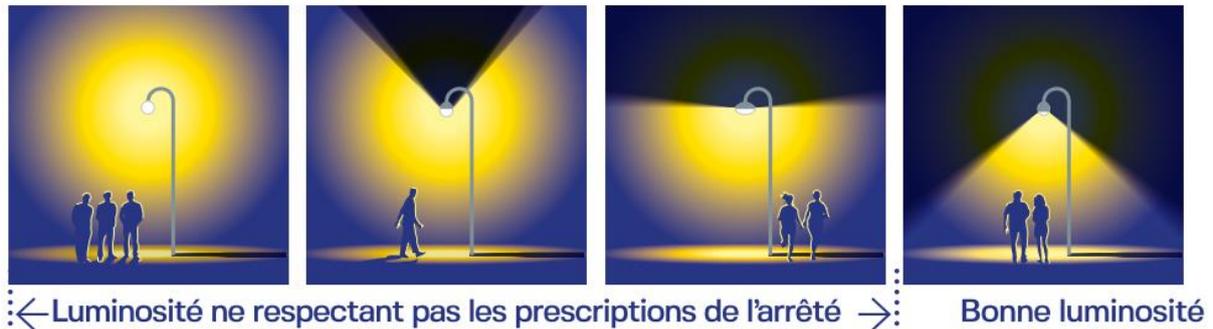


Figure 13 : Extrait des nouvelles obligations de l'arrêté de 2018 sur les nuisances lumineuses du Ministère de la Transition écologique et solidaire. Source : Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2019

Concernant la Belgique, sur les trois régions qui composent le pays (Région wallonne, Région flamande et Région Bruxelles-Capitale), seule la Flandre possède un cadre législatif où l'on retrouve une mention des nuisances liées à la lumière. Le règlement régional de l'environnement (VLAREM II) aborde la notion de pollution lumineuse en énonçant les objectifs de réduction des émissions lumineuses pouvant nuire aux activités astronomiques, à la santé humaine ainsi qu'à la faune et la flore (Aujollet & David, 2014).

Bien que la pollution lumineuse ne soit pas inscrite dans la réglementation régionale, la Région Bruxelloise ainsi que la Wallonie optent pour une nouvelle dynamique d'éclairage en 2017 : respectivement le « Plan Lumière » et le « Plan Lumière 4.0 ». Il s'agit des plans généraux concernant l'éclairage public du territoire pour les 20 prochaines années, comprenant des lignes directrices et des prescriptions à considérer sur le territoire. (Natagora, 2020a)

La Wallonie a également un guide « *Eclairage – Code de Bonne Pratique* » destiné aux maîtres d'œuvre afin qu'ils soient attentifs à l'éclairage utilisé. (Venter, 2019)

3.4. Démarches locales et guide(s) des bonnes pratiques

La pollution lumineuse est globalement mal ancrée dans les outils réglementaires. Pour palier à ce manque, ou pour approfondir l'investissement des différents publics (particuliers ou communes), il existe des recommandations pour l'éclairage. Celles-ci sont issues des différentes études sur le lien entre biodiversité et éclairage artificiel, ou proviennent de l'initiative d'associations telles que :

- l'ASCEN (Association pour la Sauvegarde du Ciel et de l'Environnement Nocturnes),
- l'ANPCEN (Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environnement Nocturnes),
- et l'IDA (International Dark-sky Association).

Les guides des bonnes pratiques insistent entre autres sur la direction du flux lumineux, la limitation de la durée d'éclairage, et la proscription des éclairages dits « inutiles ». La Figure 14 est un exemple de ces recommandations, issu d'un fascicule sur la pollution lumineuse en Suisse (Sierro, 2019).



Figure 14 : Extrait des recommandations pour l'éclairage public du fascicule "La lumière nuit!". Source : Sierro, 2019

En plus des guides de bonnes pratiques de l'éclairage, de plus en plus de localités optent pour des démarches complémentaires.

Il existe en France des initiatives de municipalités soutenues par le Ministère de la Transition Ecologique. Le label « Villes et Villages étoilés » est décerné par l'ANPCEN, afin de valoriser les démarches en faveur d'un environnement nocturne de qualité.

Afin d'aider la transition vers un éclairage responsable, des manifestations sont organisées sur le territoire français par la campagne de sensibilisation « le Jour de la nuit », adressée aux citoyens et aux collectivités. (Ministère de la Transition Ecologique, 2019)

De plus, en France, les municipalités peuvent signer des chartes sur base de volontariat pour aller plus loin. Il existe par exemple la « charte pour la protection du ciel et de l'environnement nocturne » (ANPCEN, 2000) ou la « charte en faveur d'un éclairage raisonné » de Grenoble Alpes Métropole (Franchomme et al., 2019). Ces chartes indiquent des bonnes pratiques d'éclairage à prendre en compte dans l'aménagement du territoire des communes concernées, mais apportent également le soutien d'un réseau luttant contre la pollution lumineuse pouvant offrir aide et conseils.

En Belgique, une charte existe pour la Province de Luxembourg depuis 2019 : « Province de Luxembourg, espace étoilé ». Les signataires s'engagent à l'établissement d'un éclairage intelligent sur l'ensemble de la province (ASCEN & OCA, 2019).

Il existe également des campagnes de sensibilisation menées par l'ASCEN et son équivalent flamand « Preventie Lichtinder » nommées « Nuit de l'Obscurité ». Le but est ici d'informer les citoyens et les mandataires politiques sur les différentes problématiques autour de la pollution lumineuse. (ASCEN, 2019)

3.5. Trames Noires

Depuis 2007, à la suite du Grenelle Environnement en France, l'expression de « Trame Verte et Bleue » (TVB) s'est généralisée. Cette trame représente un ensemble d'habitats forestiers, arbustifs, herbacés, ainsi qu'aquatiques et marécageux, composant un réseau écologique à l'échelle d'un territoire. Cette trame, qui a pour but de « maintenir ou restaurer les conditions écologiques vitales à la survie des populations dans un paysage fragmenté » (Franchomme et al., 2019), ne prend cependant pas en compte la dimension temporelle des écosystèmes liée à la nuit.

Sont ensuite apparues des trames secondaires, moins connues car moins médiatisées, telles que la Trame Brune (sols perméables), la Trame Grise (surfaces minérales imperméables), et la Trame Noire (obscurité) présentée sur la Figure 15.

Cette dernière, la Trame Noire, se développe depuis quelques années sur le territoire européen. Il est possible d'en entendre parler sous d'autres dénominations comme « Trame Sombre » ou « Trame Étoilée ». Cela est dû à la connotation négative des termes « nuit » et « noire » auprès du grand public. (Auricoste et al., 2018; Hendrickx, 2017)

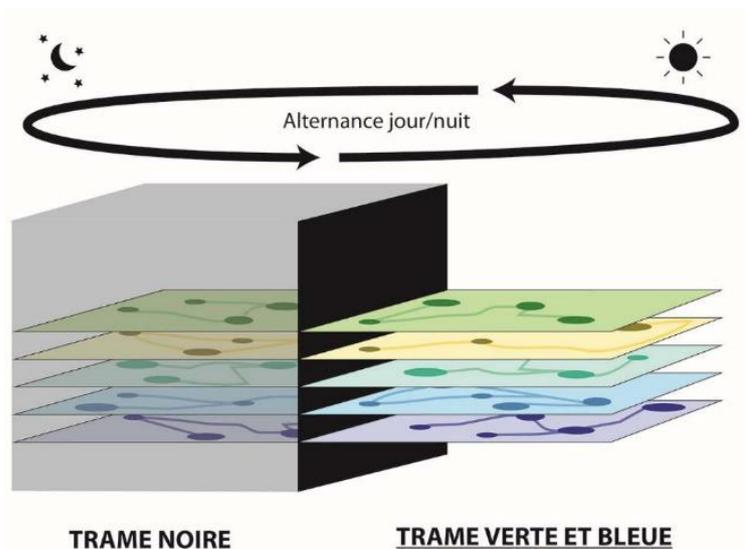


Figure 15 : Schéma explicatif de la Trame Noire. Source : Sordello, 2017b

3.5.1. Définition

Une Trame Noire correspond à un réseau qui se compose de milieux peu touchés par la pollution lumineuse (Hendrickx, 2017). Elle est, au même titre que la TVB, une continuité écologique aidant à maintenir des conditions écologiques structurelles et fonctionnelles adéquates pour la biodiversité. (Ranzoni, 2018; Sordello & UMS PatriNat, 2019). La Trame Noire se compose de zones centrales et de corridors d'obscurité (relative), devant soutenir le réseau écologique en place sur le territoire en prenant en compte les besoins d'obscurité nécessaires aux cycles de vie de la biodiversité. Le but est donc de soutenir la lutte contre la fragmentation et la disparition des habitats – cause d'érosion de la biodiversité mondiale (Laforge et al., 2019) - en prenant en compte les effets néfastes de la pollution lumineuse (Sordello, 2017b, 2017c).

3.5.2. Mise en place de Trames Noires

Il existe plusieurs méthodes de définition spatiale d'une Trame Noire, comme l'illustre la Figure 16 (Sordello & UMS PatriNat, 2019) :

- Approche par points de conflits

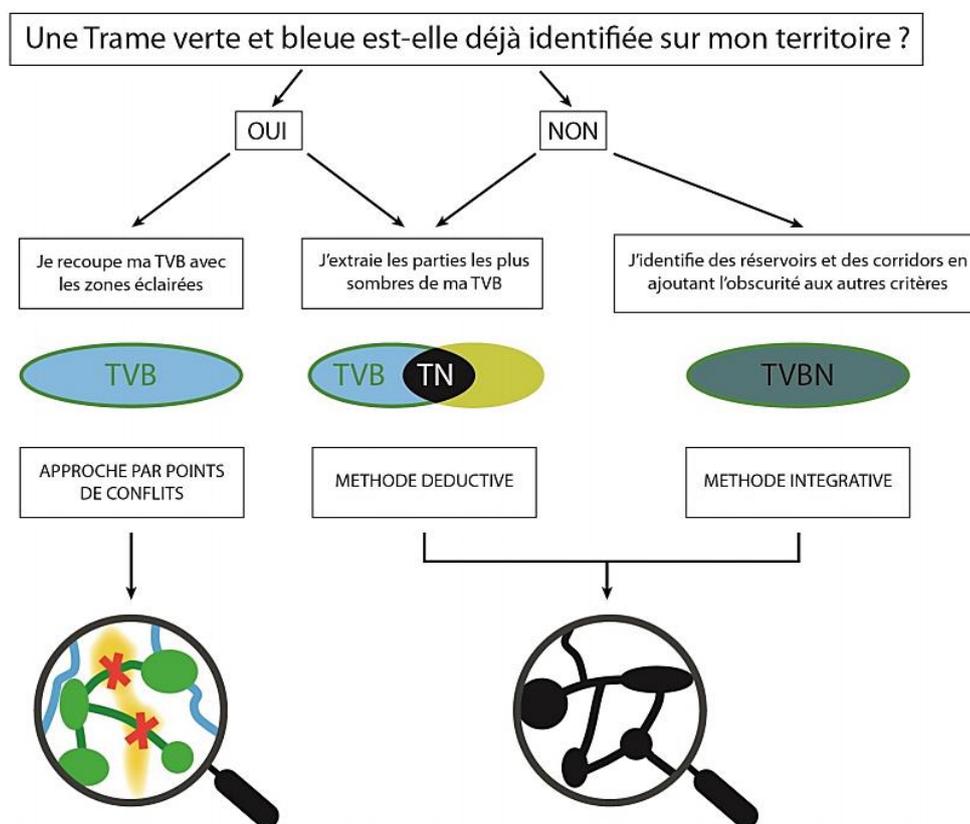
Cette méthode consiste à identifier les éclairages conflictuels vis-à-vis des Trames Verte et Bleue en place sur le territoire. En adoptant un éclairage adapté sur ces trames, on crée une Trame Noire spatialement identique aux TVB. Cette approche enrichit donc les TVB avec la dimension temporelle des besoins de la biodiversité : l'obscurité de la nuit.

- Méthode déductive

Cette définition spatiale de la Trame Noire consiste à identifier les espaces sombres déjà en place sur les TVB.

- Méthode intégrative

Cette méthode consiste à identifier la Trame Noire comme une trame à part entière, où l'on identifie sur le territoire les espaces les plus sombres. Contrairement à la méthode déductive, l'obscurité n'est pas uniquement recherchée au sein de la TVB. Cela permet de créer une seule et unique trame : la Trame Verte, Bleue et Noire (TVBN).



Romain Sordello – UMS PatriNat

Figure 16 : Méthodes de définition d'une Trame Noire. Source : Sordello & UMS PatriNat, 2019

Pour comprendre les éléments pris en compte dans la mise en place d'une Trame Noire, nous développerons dans les parties suivantes deux exemples sur le territoire français : la métropole de Lille ainsi que les Vosges Centrales. Ces exemples sont sélectionnés pour la richesse de leur documentation. Nous verrons ensuite le cas de la Wallonie, avec les prémices d'une Trame Noire.

3.5.2.1. Etude TRAMENOIRE en métropole lilloise

Entre 2015 et 2017 une étude nommée TRAMENOIRE, visant à développer une Trame Noire sur l'agglomération lilloise en France, a été réalisée. Cette étude se divise en deux volets, l'un écologique, l'autre social. Leur analyse a pour objectif le développement de la connectivité des espaces dits obscurs. (MEL, 2019)

Concernant le volet écologique, l'étude se base sur l'observation des chiroptères en fonction de la pollution lumineuse. Pour cela des inventaires écologiques ont été réalisés selon un gradient rural/obscur-urbain/éclairé, avec une prise en compte de la présence ou non de zones boisées et de cours d'eau.

Afin de déterminer les corridors écologiques nocturnes potentiels, les étapes suivantes ont été réalisées :

- Recensement des espèces de chiroptères
- Réalisation des modèles de distribution des espèces et de connectivité des habitats
- Simulations d'extinction de l'éclairage.

Les scénarios d'éclairage (réduction d'éclairage pour les voiries, parcs urbains, communes de moins de 10 000 habitants et communes de plus de 10 000 habitants) ont permis d'identifier que les corridors fonctionnels pour les chiroptères sont de manière générale les milieux aquatiques, le plus souvent accompagnés d'une végétation arborée.

Le volet social de l'étude a pour objectif de comprendre les conditions d'acceptation sociale d'un projet telle que la Trame Noire, afin d'éviter un rejet de la population. Pour cela des enquêtes de perception de l'éclairage public et de la biodiversité nocturne ont été réalisées auprès des riverains. Les professionnels concernés (services d'urbanisme et d'éclairage) ont quant à eux été réunis en groupes de parole pour partager leurs avis et craintes.

Au final, sur les 45 communes étudiées de l'agglomération lilloise, 38 ont fait des modifications d'éclairage ou ont pour projet de le faire. Différentes pratiques ont été mises en place : changement du mobilier d'éclairage (lampadaire ou ampoule), changement de la diffusion de la lumière (baisse d'intensité, éclairage à la demande), ou extinction. Cette dernière est peu utilisée car elle reçoit souvent un mauvais accueil en milieu urbain.

L'application de ces mesures s'est faite par secteurs communaux. Cela signifie que les secteurs considérés à enjeu(x) pour la biodiversité ont subi une modification de leur éclairage : les interventions sont à grande échelle.

Il n'y a pas de prise en compte du volet paysager dans cette démarche, ni dans la recherche d'une cohérence et/ou identité paysagère nocturne à l'échelle de la métropole de Lille, ni par une prise en compte du paysage local. L'intervention est basée sur la biodiversité et l'acceptation sociale d'un changement d'éclairage.

L'étude conclut également que les arguments utilisés pour l'établissement de la Trame Noire sont en majorité économiques, la volonté de prendre en compte la biodiversité et le paysage nocturne est peu affirmée, et aurait dû dans la mesure du possible être développée. (Franchomme et al., 2019)

3.5.2.2. Trame Noire des Vosges Centrales, France

Lors de la révision du Schéma de cohérence Territoriale (Scot) des Vosges Centrales en 2018, les élus ont tenu à intégrer la notion de Trame Noire aux TVB déjà présentes. Le territoire concerné a une superficie d'environ 140 000 hectares, et comprend des espaces urbains et ruraux.

Le projet de Trame Noire comprend un volet écologique et un volet sur la pollution lumineuse. L'objectif est d'identifier les espaces où l'éclairage public entre en conflit avec la biodiversité.

L'étude de la biodiversité cumule plusieurs éléments :

- Zones à enjeux pour les chiroptères
Avec une prise en compte des espèces lucifuges (uniquement), et une distinction entre les espèces forestières, les espèces de bâti, et les espèces intermédiaires.
- Zones à enjeux pour l'avifaune
Avec la prise en compte des sites identifiés ZNIEFF (zone naturelle d'intérêt faunistique et floristique), ainsi que de la vallée de la Moselle traversant le territoire.
- Réservoirs de biodiversité d'intérêt régional
- Corridors écologiques d'intérêt régional

Ces éléments permettent de cartographier à l'échelle des Vosges Centrales les zones d'enjeux nocturnes pour la biodiversité.

En parallèle, une étude de l'ALAN est réalisée. Celle-ci repose sur une modélisation de la pollution lumineuse astronomique de l'éclairage public en début et cœur de nuit.

La confrontation des données sur la biodiversité et l'ALAN permet de dégager des secteurs de conflits (Figure 17) où la problématique de l'éclairage doit être approfondie.

Le projet de Trame Noire des Vosges Centrales prend également en compte un volet social. Des actions de sensibilisation multiples sont intégrées au processus de mise en place de la trame.

Le « résultat » de l'étude de la Trame Noire est donc une cartographie des secteurs conflictuels sur l'ensemble du territoire d'étude. Une fois aux mains des communes, celles-ci peuvent adapter leur éclairage en intégrant les concepts de mise en lumière et d'ambiance nocturne.

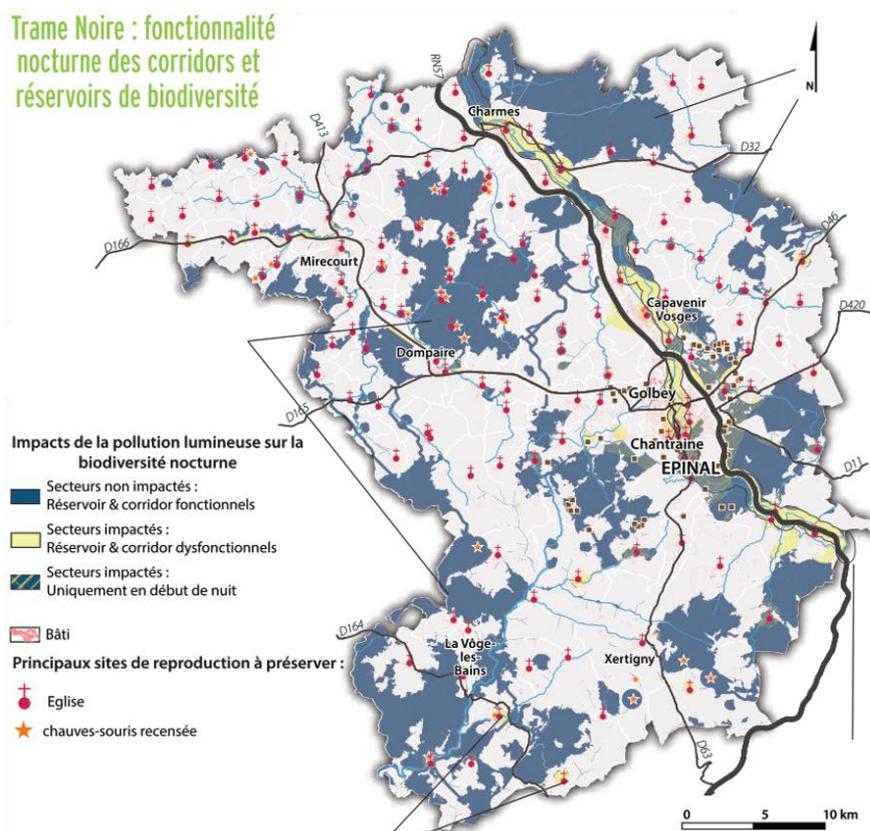


Figure 17 : Carte de synthèse des conflits entre éclairage et biodiversité sur le territoire des Vosges Centrales. Source : Trame Noire des Vosges Centrales

Tout comme l'exemple précédent, les conflits éclairage-biodiversité sont identifiés à grande échelle (secteur), et les interventions locales : chaque commune applique ses propres décisions.

Cela induit un champ d'actions limité pour la résolution des conflits : un secteur où l'éclairage est « conflictuel » est traité uniformément, par exemple par un changement du type de luminaire sur l'ensemble de la zone.

Les paysages nocturnes sont donc transformés par de nouvelles ambiances nocturnes qui ne sont que la conséquence de mesures prises pour la biodiversité.

3.5.2.3. Prémices d'une Trame Noire wallonne

Il n'existe actuellement pas de Trame Noire sur le territoire wallon, mais depuis quelques années le territoire accueille des démarches s'annonçant comme les débuts d'un réseau nocturne.

- Projet de rénovation de l'éclairage wallon

Dans le cadre du Plan Lumière 4.0, une évaluation des incidences de la rénovation de l'éclairage public autoroutier a été réalisée sur les sites Natura 2000 en 2013. Comme pour une Trame Noire, les données d'éclairage du réseau routier structurant ont été croisées avec le réseau écologique en place afin d'identifier des zones de conflits.

Les éléments sélectionnés pour représenter le réseau écologique wallon sont les zones LCN (Loi sur la Conservation de la Nature) dont Natura 2000, et les Sites de Grand Intérêt Biologique (SGIB) avec les grands massifs forestiers et les grandes zones humides. L'absence de prise en compte de la faune nocturne (et notamment des chiroptères) est mise en avant par l'étude, précisant la complexité d'obtention et de traitement des données pertinentes sur les espèces lucifuges.

La recherche de points de conflits a abouti à l'identification de 206 sites du réseau Natura 2000 en confrontation avec des tronçons routiers éclairés (éclairage à moins de 50m du réseau Natura 2000). Ces points de conflits sont considérés prioritaires par l'étude, qui les classe « secteur 1 ». Suivent en « secteur 2 » et « secteur 3 » respectivement les conflits voiries régionales- SGIB, et voiries-sites restants.

L'étude d'incidence de la rénovation de l'éclairage conclut sur l'importance du principe de précaution en termes d'éclairage, puisque les impacts sur la biodiversité sont encore mal connus. Elle conseille donc l'adoption de mesures d'atténuation pour le Plan Lumière 4.0 et incite à la sobriété sur les habitats sensibles.

Cette étude a également incité le projet « Smart Light-Hub » dirigé par Natagora sur le territoire de la Grande Région. L'objectif est d'évaluer les effets des éclairages dits néfastes (LED 4000K) et les éclairages moins impactants (2200K) sur la biodiversité. L'étude sera menée dans un premier temps dans les milieux ouverts comme les prairies et bocages, puis dans un second temps dans les milieux fermés forestiers. (Natagora, 2020b)

Bien que ces deux études n'aboutissent pas directement à la création d'une Trame Noire dans le paysage nocturne wallon, elles permettent de faire avancer les connaissances sur les relations entre éclairage et biodiversité sur de larges espaces. Elles permettent également d'avoir une première approche de la problématique de l'éclairage sur les habitats et espèces d'intérêt biologique important en Wallonie.

- Début de Trame Noire dans les Parcs naturels

Les Parcs naturels wallons ont pour vocation le développement d'un territoire rural dans une dynamique durable en alliant les volets économiques, sociaux et environnementaux. Ces Parcs accueillent de nouveaux projets qui « (Offrent) la possibilité d'expérimenter de nouveaux modes de gestion pour pouvoir, par la suite, étendre les démarches les plus intéressantes à l'ensemble du territoire wallon. » (Parc naturel Burdinale-Mehaigne, n.d.).

Cette vocation, ainsi que la richesse de leur biodiversité, font des Parcs naturels des territoires favorables aux débuts des Trames Noires wallonnes.

En 2019, le DEMNA (Département de l'Etude du milieu naturel et agricole), l'ASCEN et les Parcs naturels s'associent pour former un groupe de travail sur les thématiques de la pollution lumineuse et de la Trame Noire. (Fédération Parcs naturels de Wallonie, 2019)

L'importance de la biodiversité au sein des Parcs naturels, ainsi que le souci apporté à leurs paysages, demandent une Trame Noire répondant aux aspects écologiques et paysagers de ces territoires.

4. Conclusion

Cette étude bibliographique montre qu'au fil du temps, l'Homme ne s'est pas adapté à la nuit mais l'a adaptée à lui, ou du moins à ses besoins socio-économiques nouveaux : il l'a éclairée, l'a fait reculer.

Cette conquête de la nuit a généré la pollution lumineuse. L'Homme en est fortement impacté : en perdant l'obscurité il a perdu son ciel étoilé, sa fenêtre sur l'univers, et a perturbé la biodiversité dont il fait partie et dont il dépend.

Bien que les premières études du lien entre la lumière artificielle et de la biodiversité datent d'un siècle, ce n'est que depuis les années 1990 que les études systématiques se multiplient à travers le monde.

Nous avons maintenant de nombreuses études sur les relations entre lumière artificielle et biodiversité, notamment sur les chiroptères qui représentent les espèces parapluies nocturnes les plus reconnues. Les impacts réels de la pollution lumineuse sur le long terme et à l'échelle des écosystèmes restent cependant peu étudiés et maîtrisés.

Malgré cela, nous éclairons chaque année un peu plus nos territoires. L'apparition de nouvelles technologies, les LEDs, nous mène vers une transition globale de l'éclairage artificiel, voire une forte augmentation de ce dernier, sans avoir de recul sur les effets engendrés sur le long terme.

Bien que la nuit obscure et le ciel étoilé puissent être considérés comme des ressources essentielles à l'Homme (et au monde du vivant), la reconnaissance mondiale de ces deux éléments est délicate. Si une nuit de qualité ne peut être reconnue comme patrimoine mondial, elle est tout de même mise à l'honneur par plusieurs organismes d'échelle mondiale.

Grâce à cela, la problématique de la pollution lumineuse a abouti à la rédaction d'outils réglementaires nationaux et supranationaux mais qui ont peu d'influence sur l'ampleur du phénomène.

En parallèle, de nombreux guides et démarches voient le jour afin de sensibiliser tous les acteurs du paysage nocturne, citoyens ou politiques. L'objectif est que tous puissent comprendre les enjeux de la nuit et agir à leur échelle. Cependant l'ensemble des connaissances est peu médiatisé, et malgré des lois et actions collectives, nombreux sont les acteurs dans l'ignorance des solutions potentielles, si ce n'est des problèmes eux-mêmes. Cela s'illustre avec l'apparition massive des LEDs, sans que leur impact sur la biodiversité, déjà en déclin, ne soit connu.

La mise en place de Trames Noires semble être à l'heure actuelle une réponse appropriée aux multiples enjeux de la pollution lumineuse :

- économiques (consommation énergétique, coût, attractivité),
- socio-culturels (accès à l'environnement et à la nature, l'obscurité comme facteur d'individuation),
- écologiques (menaces sur la biodiversité et les écosystèmes),
- sanitaires.

Cependant, l'analyse des conflits entre biodiversité et éclairage sont souvent à l'échelle de quartiers ou de secteurs, induisant des mesures globales. Les notions de paysages et d'ambiances nocturnes sont alors reportées au second plan, notamment dans les espaces ruraux.

La Wallonie n'a pas encore de Trame Noire sur son territoire, mais nous constatons une volonté certaine d'agir pour la biodiversité. Les Parcs naturels sont particulièrement aptes à accueillir cette nouvelle trame, dont notre cas d'étude : le Parc Naturel Burdinale-Mehaigne.

La suite de ce rapport vise à préparer la mise en place d'une Trame Noire sur le cas d'étude. En ciblant avec précision les conflits entre biodiversité et éclairage, nous souhaitons réaliser un support adéquat pour une intervention paysagère nocturne favorable aux besoins d'obscurité de la biodiversité.

Hypothèses et objectifs

Rappelons la question guidant notre recherche :

Peut-on préparer une intervention paysagère nocturne prenant en compte la pollution lumineuse écologique à l'échelle d'un Parc naturel en Wallonie ?

Suite à notre étude bibliographique, nous pouvons émettre deux hypothèses pour le Parc naturel Burdinale-Mehaigne.

Hypothèse n°1

Aux vues des caractéristiques de l'ALAN et de leurs impacts sur la biodiversité, nous posons la première hypothèse :

La transition de l'éclairage traditionnel vers les LEDs va augmenter la fragmentation du paysage nocturne pour la biodiversité.

Hypothèse n°2

La diversité des variables de la lumière artificielle offre une multitude d'actions possibles pour repenser l'éclairage. Par extension, nous pouvons dire qu'il existe de nombreux outils pour la création d'ambiances paysagères nocturnes tout en prenant en compte la biodiversité. Afin d'apporter une future réponse paysagère cohérente à l'échelle du Parc naturel, il est nécessaire de prendre en compte sa dimension nocturne. Sur cette base, nous posons la seconde hypothèse :

L'utilisation d'une typologie d'espaces basée sur la structure du Parc permet d'intégrer l'ensemble des conflits biodiversité-éclairage dans un support permettant de développer des identités paysagères nocturnes.

Sur base de ces deux hypothèses, ce rapport vise les objectifs suivants :

- **Amorcer la mise en place d'une Trame Noire sur le Parc naturel Burdinale-Mehaigne**
 - Identifier les points de conflit entre éclairage et biodiversité, définir des critères d'acceptabilité
 - Etablir une typologie des espaces représentative du Parc pouvant intégrer l'ensemble des conflits identifiés

Et pour cela :

- **Appréhender l'éclairage nocturne sur le territoire du Parc, quantifier et qualifier la lumière émise**
 - Identifier les sources de données disponibles sur la lumière nocturne à l'échelle du Parc naturel Burdinale-Mehaigne
 - Réaliser un protocole d'interprétation et de traitement des données
 - Anticiper la transition de l'éclairage public vers l'installation systématique des LEDs

- **Comprendre comment l'éclairage du Parc naturel impacte la biodiversité**
 - Identifier la biodiversité du Parc naturel
 - Analyser les interfaces lumière-biodiversité

- **Identifier une structure spatiale du cas d'étude**
 - Sélectionner parmi les éléments structurants du Parc ceux susceptibles d'exprimer une identité nocturne du territoire
 - Evaluer la pertinence de la typologie d'espaces utilisée

Matériels et Méthodes

1. Méthode générale et cas d'étude

Afin d'étudier les hypothèses établies précédemment, la méthodologie présentée sur la Figure 18 est suivie. Les étapes sont détaillées dans les parties suivantes.

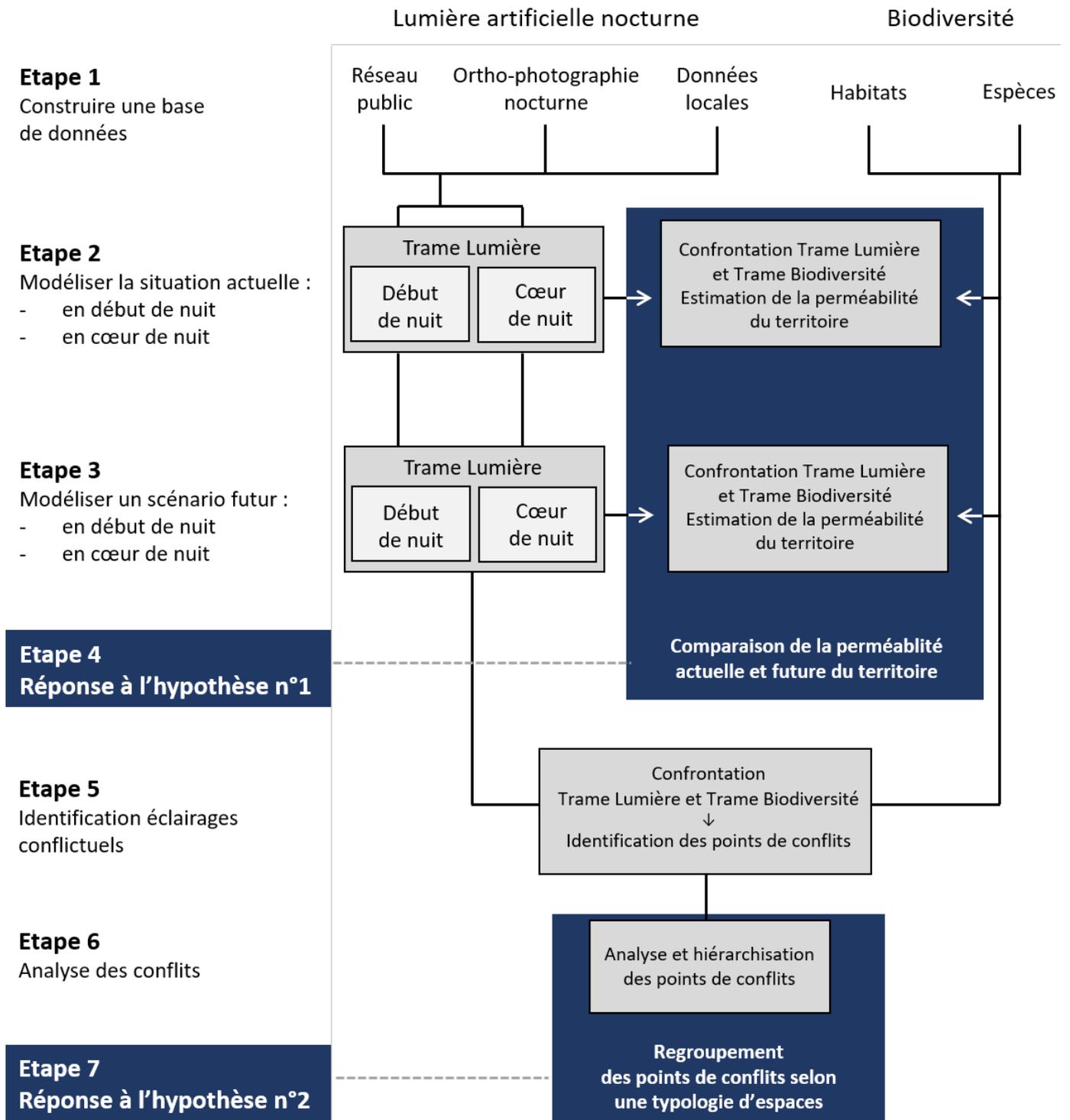


Figure 18 : Schéma explicatif de la méthodologie de l'étude. Source : Charlotte Angerand

Dans le cadre de ce rapport, la méthodologie s'applique au Parc naturel Burdinale-Mehaigne. Le Parc se situe dans la Province de Liège en Wallonie et comprend 4 communes : Burdinne, Braives, Héron et Wanze (Figure 19). Cela représente un total de 22 villages pour environ 15 000 habitants, sur 11 000 hectares.

Le Parc est traversé par deux affluents de la Meuse, la Burdinale et la Mehaigne, qui lui ont donné son nom. Leurs vallées ainsi que le plateau agricole qui les surplombe témoignent des paysages de la Hesbaye.

Ce territoire abrite une grande diversité d'espèces et d'habitats d'intérêt communautaire, et s'implique fortement dans les projets de protection et de conservation les concernant.

Le Parc naturel Burdinale-Mehaigne a débuté une transition de son éclairage public vers les LEDs devant se finaliser d'ici 2030. Cela implique le besoin d'estimer les impacts de ce projet sur la biodiversité en place.

Ces différents éléments, ainsi que l'implication du Parc Burdinale-Mehaigne dans le groupe de travail sur les Trames Noires des Parcs naturels wallons, ont abouti à sa sélection pour notre travail.



Figure 19 : Parc naturel Burdinale-Mehaigne. Source : Charlotte Angerand, basé sur ortho-photographie

2. Etapes détaillées de la méthodologie

2.1. Construction d'une base de données

L'objectif d'une Trame Noire est de défragmenter le paysage nocturne en tenant compte de la biodiversité en place dans la conception de l'éclairage. La première étape est donc de regrouper les informations concernant la lumière artificielle nocturne ainsi que la biodiversité sur le territoire étudié. Nous appellerons ici les données d'éclairage les éléments de la Trame Lumière (TL), et les données de la biodiversité les éléments de la Trame Biodiversité (TB).

Cette partie présente les différentes données utilisées, ainsi que la façon dont elles sont traitées.

2.1.1. Trame Lumière

L'ALAN provient de sources multiples et diverses, et se retrouve sous différentes formes. Il est donc important de varier les sources de données sur l'éclairage pour en avoir une vue d'ensemble au plus proche de la réalité.

Les approches présentées dans ce rapport se focalisent notamment sur l'éclairage public, et plus succinctement sur l'éclairage privé (industrie, commerce, établissement). Elles n'abordent que succinctement l'éclairage domestique. Ce choix est lié à la rareté des données concernant l'éclairage à l'échelle des particuliers.

Les sources d'informations utilisées pour définir la Trame Lumière se classent en trois catégories :

- Trame lumineuse principale,
- Ortho-photographie nocturne,
- Données locales.

Les parties suivantes visent à préciser ces dénominations ainsi que ce qu'elles représentent.

2.1.1.1. Trame lumineuse principale

Cette source d'information correspond au réseau d'éclairage public des voiries. L'aspect fonctionnaliste de la mise en place de l'éclairage –comme nous l'avons vu précédemment- fait que les voiries représentent la majeure partie de la lumière artificielle émise la nuit dans le domaine public : c'est la trame lumineuse principale.

Le relevé des luminaires est demandé au gestionnaire des réseaux de distribution d'électricité et de gaz en place sur le territoire d'étude. Il en existe plusieurs sur le territoire wallon, présentés sur le Tableau 7.

Tableau 7 : Gestionnaires des réseaux de distribution d'électricité et de gaz en Wallonie et leurs zones d'action. Source : Charlotte Angerand

ORES	Provinces du Brabant wallon, de Luxembourg, du Hainaut et de Namur
RESA	Province de Liège
AIEG	Communes d'Andenne, Gesves, Ohey, Rumes et Viroinval
AIESH	Beaumont, Chimay, Couvin, Erquelines, Froichapelle, Momignies et Sivry-Rance
Régie de Wavre	Ville de Wavre

Concernant le réseau structurant (autoroutes) wallon, un projet de rénovation et transition des éclairages Sodium vers les LEDs est en cours (2019-2022). Ce projet « LuWa » s'inscrit dans le Plan Lumières 4.0, et vise à moderniser l'éclairage sur le territoire de Wallonie. Les données concernant la nature actuelle des éclairages autoroutiers, ainsi que la planification de la transition sont disponibles auprès du Service Public Wallon.

2.1.1.1.1. Utilisation des données

Le format de la donnée est un relevé de points géolocalisés utilisable sous logiciel SIG. Sont associées à chaque point les informations suivantes :

- coordonnées GPS,
- type de lampe,
- hauteur de l'éclairage,
- date de mise en service.

Afin de matérialiser la trame lumineuse principale, à chaque luminaire doit être attribuée une zone tampon correspondant au halo lumineux émis. L'objectif est d'obtenir une surface lumineuse associée à chaque luminaire (au mieux représentative de la surface éclairée réelle).

Pour définir les zones tampons de chaque éclairage, des mesures *in situ* sont réalisées. Deux variables de la lumière sont quantifiées : la température de la source lumineuse (en Kelvin), ainsi que la largeur du halo lumineux autour de la source, en quantifiant le flux lumineux (en Lux). Ces deux mesures sont réalisées grâce à un spectrophotomètre.

Les mesures nécessitent une sélection préalable des luminaires à étudier. Celle-ci se base sur les variables que l'on estime impactantes sur la taille du halo lumineux :

- type de lampe (SBP, SHP, LED, ...),
- hauteur de la lampe.

Ces deux variables permettent d'établir les typologies d'éclairage les plus représentées sur le territoire d'étude, et sur lesquelles porteront les mesures.

Notons que nous étudions séparément les luminaires d'autoroutes et les luminaires du reste du réseau routier. L'éclairage autoroutier étant de manière générale distinguable par sa hauteur, nous le considérons dans une catégorie à part.

Une dernière donnée entre en compte lors de la sélection des luminaires pour les mesures : l'isolement. Comme le montre la Figure 20, choisir un éclairage isolé ou en extrémité d'un alignement permet de mesurer uniquement le flux lumineux souhaité.

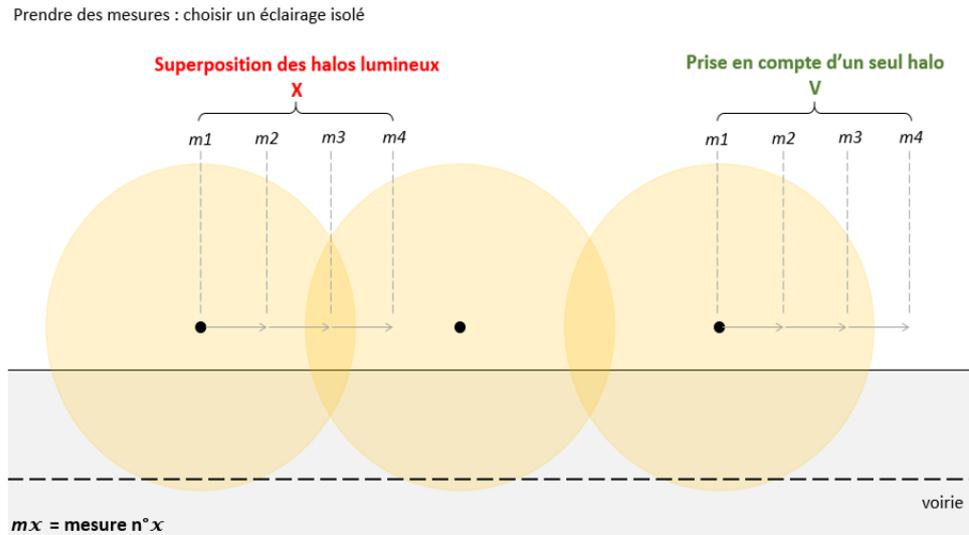


Figure 20 : Schéma explicatif de la sélection d'un éclairage pour la mesure de son flux lumineux. Source : Charlotte Angerand

Le protocole de mesure *in situ* est schématisé sur la Figure 21. La lumière émise est mesurée dans deux directions : parallèlement et perpendiculairement à la voirie.

Une première mesure est réalisée sous la source de lumière (0m de distance au sol). Deux données sont quantifiées : la température de la lumière (K) et le flux lumineux (Lux). Puis, pour chaque direction, une mesure est réalisée tous les 5 mètres jusqu'à ce que l'appareil ne capte plus le flux lumineux (inférieur à 1lux).

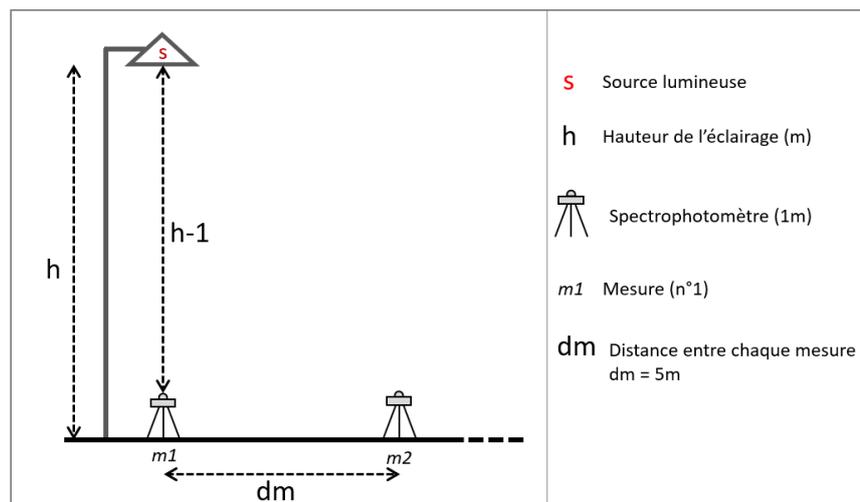


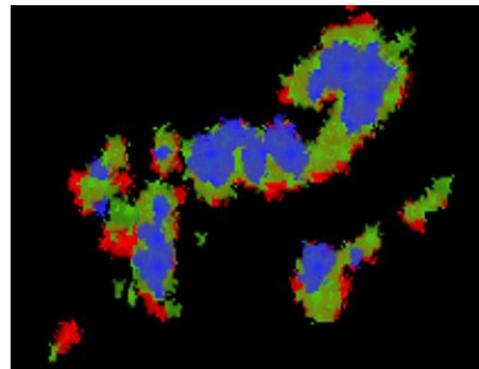
Figure 21 : Schéma du protocole de mesure du flux lumineux d'un éclairage. Source : Charlotte Angerand

Les valeurs obtenues permettent de modéliser la zone tampon lumineuse autour de chaque éclairage en fonction du type de lampe et de la hauteur, et ainsi obtenir la surface lumineuse associée au réseau public des voiries.

2.1.1.2. Ortho-photographie nocturne

L'ortho-photographie nocturne est un cliché satellitaire d'un territoire réalisé la nuit. L'image apporte différentes informations : les localisations des émissions lumineuses, leurs surfaces, ainsi que le spectre de l'émission.

L'ortho-photographie nocturne utilisée est fournie par le satellite Jilin-01. Ce dernier permet une prise d'image multi-spectrale du territoire : l'image obtenue est un assemblage de clichés pris dans les canaux rouge, vert et bleu (Figure 22) avec une résolution de $1\text{px} = 1\text{m}^2$.



BLEU (canal 1)	450-520 nm
VERT (canal 2)	520-600 nm
ROUGE (canal 3)	630-690 nm

Figure 22 : Extrait d'ortho-photographie nocturne (Parc naturel Burdinale-Mehaigne). Source : Charlotte Angerand, basé sur Geocarto International Centre Ltd

2.1.1.2.1. Utilisation de la donnée

L'utilisation de l'ortho-photographie nocturne dans la réalisation de la Trame Lumière nécessite un traitement de l'image sur un logiciel SIG. Les grandes étapes de ce traitement sont les suivantes :

- Isoler les 3 canaux

Pour chaque canal (rouge, vert, bleu), les pixels possèdent un nombre digital (DN) entre 0 et 255 représentant la puissance d'émission. Ainsi, un DN=0 signifie qu'il n'y a pas d'émission dans la couleur du canal, et DN=255 que la couleur est émise à son maximum. A titre d'exemple, un pixel bleu se caractérise par l'expression : DN rouge = 0 ; DN vert = 0 ; DN bleu = 255.

Notons également qu'un pixel de l'image peut résulter d'une superposition de plusieurs canaux : un pixel blanc est l'expression des 3 canaux (par exemple DN rouge = 100 ; DN vert = 100 ; DN bleu = 100). Nous faisons ici le choix de ne pas distinguer les émissions selon leur puissance, l'information est traitée de façon binaire :

$1 \leq \text{DN} \leq 255$: présence d'émission, pixel conservé pour la Trame Lumière

DN=0 : absence d'émission, suppression du pixel

- Repérer les artefacts

L'ortho-photographie nocturne peut présenter des artefacts. Cela peut par exemple être dû à la géolocalisation de l'ortho-photographie qui induit des déformations de l'image source.

Nous choisissons ici d'identifier et supprimer les artefacts manuellement.

L'approche se base sur la comparaison de la localisation des émissions de lumière à :

- ortho-photographie (non nocturne),
- occupation du sol,
- observations de terrain.

Ainsi, les pixels isolés et situés hors des zones d'occupation humaine et n'ayant aucune justification potentielle sont mis de côté car considérés comme artefacts.

- Identifier des sources lumineuses, ou zones de fortes émissions

Cette étape est également un travail manuel, où l'on souhaite identifier les différents éclairages actifs n'appartenant pas à la trame lumineuse principale.

Certaines émissions peuvent être assimilées à des sources (point distinct formé par un regroupement des pixels en cercle), d'autre non (surface lumineuse) (Figure 23).

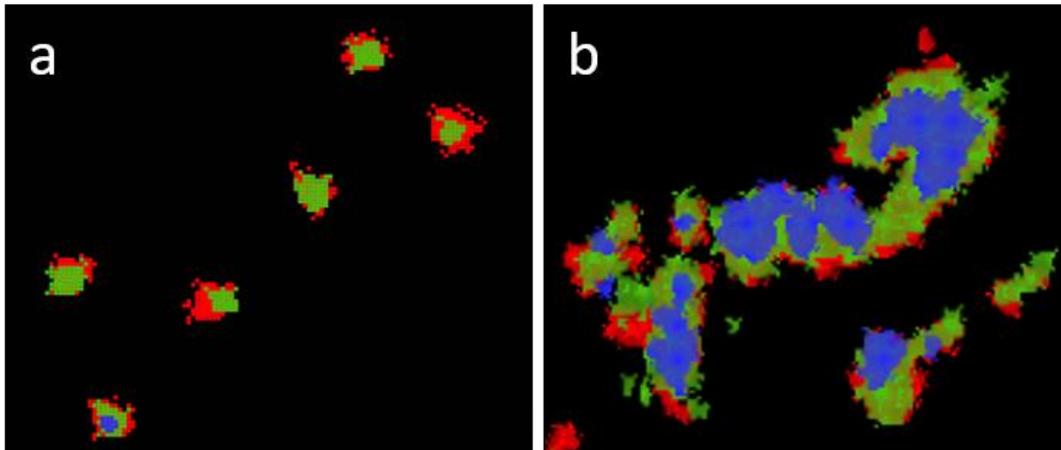


Figure 23 : Différentiation entre source lumineuse distincte et surface lumineuse sur ortho-photographie nocturne. a) groupements de pixels en cercle, source lumineuse distincte ; b) surface lumineuse, sources non distinguables. Source : Charlotte Angerand

Concernant les sources distinctes, nous choisissons ici de les différencier en plusieurs catégories (basées sur une analyse par ortho-photo) :

- Particuliers (façades d'habitations et jardins)
- Voiries (hors trame lumineuse principale)
- Commerces
- Industries et/ ou activités agricoles
- Edifices religieux et monuments
- Equipements collectifs
- Autres (s'il y a présence d'entités particulières sur le territoire)

Les superficies lumineuses doivent être identifiées afin de savoir qui sont les gestionnaires de l'éclairage.

2.1.1.3. Données locales

Ces données de terrain représentent les informations locales de l'éclairage. Il est nécessaire de prendre contact avec les communes/municipalités afin d'avoir des informations sur leur politique d'éclairage. Cela permet d'obtenir des informations complémentaires sur le territoire d'étude telles que :

- Présence de monuments éclairés
- Dimming
- Horaires d'extinction
- Projets de renouvellement de l'éclairage

2.1.1.4. Données sur le cas d'étude

La réalisation de la base de données pour la modélisation de la Trame Lumière telle que précédemment expliquée est réalisée sur le Parc naturel Burdinale-Mehaigne. Les données obtenues sont énumérées ci-après.

2.1.1.4.1. Trame lumineuse principale du Parc

Le Parc Burdinale-Mehaigne étant sur la Province de Liège, le gestionnaire des réseaux de distribution d'électricité est RESA. La donnée fournie correspond au relevé des luminaires aux échelles des voiries locales, nationales et des autoroutes.

Parmi les 4568 éclairages du réseau RESA (hors autoroutes) présents sur la superficie du parc, les typologies les plus représentées sont identifiées afin de réaliser les mesures de flux lumineux. Les critères de définition des typologies choisis sont la hauteur des éclairages, ainsi que le type de lampe. Le détail de la sélection est présenté en Annexe 1.

2.1.1.4.2. Ortho-photographie nocturne du Parc

Les clichés de l'ortho-photographie fournie par le satellite Jilin-01 recouvrent les 11 000 hectares du Parc naturel Burdinale-Mehaigne avec une résolution de $1\text{px} = 1\text{m}^2$. Ils ont été réalisés le 18 septembre 2020 aux alentours de 22h, par ciel dégagé.

2.1.1.4.3. Données locales du Parc

L'éclairage public du Parc naturel est en plein renouvellement. Une transition vers l'éclairage aux LEDs s'opère sur les quatre communes du parc, et l'on estime que ces changements seront achevés d'ici une dizaine d'années (2030).

Actuellement, seule la commune de Burdinne a commencé la transition avec le remplacement des éclairages publics Sodium Basse Pression par des LEDs. Suivra le remplacement des éclairages Sodium Haute Pression en 2022 (RESA, 2019). La suite de la transition de l'ensemble de l'éclairage du Parc sera réalisée dans les années suivantes.

Les LEDs installées sur le Parc sont des LEDs blanches dites « neutres » et « chaudes ». Elles ont une température respective de 3000-4000K environ et moins de 3000K. Ce sont des LEDs avec un spectre polychromatique, émettant donc dans les longueurs d'onde du bleu.

Il existe différentes politiques d'éclairage sur les communes qu'il est important de connaître pour modéliser la Trame Lumière du Parc, présentées dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Récapitulatif des données disponibles pour les communes de Burdinne et Braives sur le Parc. Source : Charlotte Angerand, basé sur les communications des communes de Braives et Burdinne.

	Burdinne	Braives
Eclairage toute la nuit	Eclairage public Administration Fontaine de Burdinne Eglise de Hannêche	Eclairage public Maison communale Monument aux morts d'Avennes <i>Rue de Lens Saint Rémy, Avennes</i> Rond-point du coq Eglise de Latinne <i>Place Arthur Maquet, Tourinne</i>
Jusqu'à 22h	Gare de Burdinne	Eglise Saint Pierre, Braives <i>Rue Saint Pierre</i> Eglise de Ville-en-Hesbaye Eglise de Tourinne <i>Rue de Fleuron, Fumal</i> <i>Rue Bossiaux, Fallais</i> <i>Rue de l'église, Fallais</i> Monument aux morts et église rue de Void, Ciplet
Jusqu'à 00h	Monuments de Lamontzée (en semaine) Monuments de Marneffe (en semaine) Monuments d'Oteppe (en semaine)	
Jusqu'à 02h	Monuments de Lamontzée (week-end) Monuments de Marneffe (week-end) Monuments d'Oteppe (week-end)	

L'éclairage des rues citées est décoratif

Enfin, la transition LEDs des quatre communes s'accompagnera de la mise en place du dimming suivant :

- De l'allumage à 20h : 100% puissance
- 20h-6h : 50%
- 6h à l'extinction : 100%

L'éclairage autoroutier subit également une transition vers les LEDs accompagnée par la mise en place d'une régulation de l'intensité lumineuse. Nous ne parlons cependant pas de dimming car la régulation de l'éclairage est en lien avec le trafic, les conditions météorologiques, la présence de travaux ou d'accidents sur la voirie. Il n'y a pas donc pas d'horaire prédéfini. (SPW & SOFICO, 2019)

Notons que les cartes de transition des éclairages autoroutiers ne concernent pas tous les luminaires du relevé fourni par le gestionnaire sur le Parc. Nous considérons ici que si la transition LED n'est pas mentionnée dans le projet LuWa, le type de lampe actuel est conservé dans les années à venir (Sodium Haute Pression).

2.1.2. Trame Biodiversité

La Trame biodiversité se décompose en 2 sous-trames : Trame Espèces et Trame Habitats. Il faut dans un premier temps identifier les données nécessaires à la réalisation de ces deux sous-parties, définir le patrimoine naturel existant.

2.1.2.1. Trame Espèces

La Trame Espèces prend tout d’abord en considération les liaisons écologiques établies à l’échelle régionale. Elles se définissent comme « les éléments du réseau écologique [qui] jouent un rôle majeur à différentes échelles dans la survie à long terme des espèces végétales et animales » (SPW, 2020). Ces liaisons écologiques relient des sites reconnus par la Loi sur la Conservation de la Nature, et leur repérage a pour objectif de prévenir la fragmentation et l’artificialisation du territoire.

La Trame Espèces prend également en considération les chiroptères, présentés au début de ce rapport comme espèces parapluies de l’étude de la pollution lumineuse.

En Belgique, toutes les espèces sont protégées par le décret Natura 2000 (annexe IIa) de 2001 (Natagora, n.d.).

Il existe des relevés sur une grande partie du territoire wallon, financés par la Région Wallonne. Ils sont disponibles auprès de *Plecotus*, pôle de Natagora consacré aux chiroptères.

Il existe deux types de relevés : les gîtes et les points de contact. Les gîtes sont des lieux identifiés où les chauves-souris logent ; les points de contact correspondent à des relevés d’ultra-sons émis par des individus, enregistrés lors de leur passage.

2.1.2.1.1. Utilisation de la donnée

Les liaisons écologiques d’échelle régionale sont utilisées comme support de la Trame Espèces.

A celles-ci nous ajoutons les gîtes de chiroptères ainsi que les surfaces adjacentes devant être préservées de l’ALAN. Il s’agit de déterminer, autour des gîtes, le territoire « utile » aux espèces concernées et que l’éclairage ne doit pas fractionner.

Ces périmètres sont définis cartographiquement : nous nous basons sur l’accessibilité des espèces aux habitats qui leur sont nécessaires. Ces périmètres correspondent donc à des zones d’attention particulière à l’éclairage : celui-ci ne doit pas fragmenter l’habitat des chiroptères. Pour cela nous prendrons en compte l’écologie des espèces identifiées pour déterminer une surface minimale d’accès aux habitats nécessaire à la viabilité des individus.

2.1.2.2. Trame Habitats

La Trame Habitats se compose des habitats où la présence de lumière artificielle est particulièrement conflictuelle avec la biodiversité. Ces habitats se divisent en trois catégories :

- Catégorie 1

Habitats à valeur légale et mesures de protection strictes.

Il s’agit des réseaux et sites dont le statut est reconnu par la Loi sur la Conservation de la Nature de 1973 (SPW) :

- Réserves naturelles
- Réserves forestières
- Zones Humides d’Intérêt Biologique (ZHIB)
- Cavités Souterraines d’Intérêt Scientifique (CSIS)
- Sites Natura 2000

Les zones centrales de la Structure Ecologique Principale (SEP) sont ajoutées, car elles englobent des sites où la conservation de la nature est prioritaire :

- Zones centrales caractéristiques
- Zones centrales restaurables

Ces zones se matérialisent notamment sur le territoire par les Sites de Grand Intérêt Biologique (SGIB), dont il existe un inventaire à l'échelle de la Wallonie.

- Catégorie 2

Éléments restants de la SEP

Il s'agit des zones de développement de la SEP, servant d'espaces de liaison potentielle ou de zone tampon.

- Catégorie 3

Habitats complémentaires

Il s'agit des habitats/occupations du sol/éléments identifiés comme nécessaires à l'écologie des espèces parapluies sélectionnées. Ainsi, pour chaque espèce de chiroptère intégrée à la Trame Espèces, les milieux nécessaires à leurs besoins – non compris dans les catégories précédentes – sont réunis dans la catégorie 3.

2.1.2.3. Données sur le cas d'étude

Le territoire Burdinale-Mehaigne n'a pas été étudié par Plecotus, mais des relevés ont été réalisés à l'initiative du Parc. Ce rapport se base sur deux relevés d'étude des chiroptères de 2016 et 2017. Il s'agit d'une étude avec inventaire des colonies estivales (Petit, 2016), ainsi qu'un relevé des gîtes du Petit Rhinolophe de 2017. Les espèces identifiées sur le Parc sont intégrées à la Trame Espèces :

- *Pipistrellus sp.*, dont *Pipistrellus pipistrellus* (Pipistrelle commune)
- *Plecotus sp.*, dont *Plecotus austriacus* (Oreillard gris)
- *Eptesicus sp.*
- *Myotis sp.*, dont *Myotis mystacinus* (Murin à moustaches)
- *Rhinolophus hipposideros* (Petit Rhinolophe)

L'étude de 2016 présente également des gîtes de chiroptères où l'espèce n'a pu être identifiée. L'étude s'accompagne de relevés acoustiques sur le Parc, pris en compte dans la Trame Espèces.

Concernant la Trame Habitats, les éléments suivants du Parc la composent :

- **Catégorie 1**

Le Parc comprend deux sites Natura 2000, une réserve naturelle ainsi que 21 SGIB (Tableau 9). S'ajoutent les zones centrales de la SEP définies par le Parc naturel sur une surface de 1232 hectares.

Les zones centrales incluent la totalité des SGIB (198,45 ha), la réserve naturelle, ainsi que 490,2 ha Natura 2000.

La catégorie 1 a une surface totale de 1260,8 hectares.

- **Catégorie 2**

La SEP du Parc identifie environ 550 zones de liaison, représentant une superficie de 190,1 hectares.

- **Catégorie 3**

Les espèces de chiroptères présentes sur le Parc ont été précédemment citées. Les différents milieux nécessaires à leur écologie, en prenant en compte qu'il s'agit de gîtes d'été, correspondent à leurs sites de chasse (Tableau 10).

Tableau 9 : Liste des sites de la catégorie 1 de la Trame Habitats du Parc naturel Burdinale-Mehaigne. Source : Charlotte Angerand, basé sur les données de la biodiversité de Wallonie.

	Code	Nom	Surface
Natura 2000	BE33008	Vallée de la Burdinale	292 ha
	BE33009	Vallée de la Mehaigne	227 ha
Réserve naturelle	6219	Marais de Hosdent	8,34 ha
SGIB	311	Marais de Hosdent	9,71 ha
	312	Bas Drez	22,65 ha
	698	Sablère Noël	6,69 ha
	1050	Corphalie	78,56 ha
	1646	Petite Carrière de la Butte Saint-Sauveur à Pitet	0,19 ha
	1660	Rocher de la Marquise et Bois de Hama	1,22 ha
	1896	Carrière de Robiéwez	0,47 ha
	1997	Vallée de la Mehaigne à Fumal	23,10 ha
	1998	Bois de Mozon	14,83 ha
	2616	Les Prés Coutralles	6,46 ha
	2617	Fond du Ruisseau de Falihou	6,74 ha
	2647	Les Fesses Madame	19,03 ha
	2755	Ruines du château féodal de Moha	-
	2843	Talus schiteux de Hosdent	0,09 ha
	3067	Ancienne carrière de Roua	-
	3149	Prairies humides du pont de Latinne	6,71 ha
	3182	Prairie de la Ferme de Monthessal	-
	3219	Aulnaie marécageuse de Pitet	-
	3259	Zone humide et mare de Hannêche	2 ha
	3371	Bois de Robaumont	-
	3427	Champia	-

Tableau 10 : Synthèse des habitats nécessaires à la chasse des espèces de chiroptères. Source : Charlotte Angerand, basé sur Didion et al., 2019; SPW, 2015

	Habitats nécessaires à la chasse						Tolérance ALAN
	Forêt	Lisière	Vergers	Arbre isolé	Prairie	Eau	
<i>Pipistrellus sp.</i>	x	x				x	x
<i>Pipistrellus pipistrellus</i>	x	x			x	x	x
<i>Plecotus sp.</i>	x	x	x	x	x		
<i>Plecotus austriacus</i>							
<i>Myotis sp.</i>	x	x				x	
<i>Myotis mystacinus</i>	x	x				x	
<i>Eptesicus sp.</i>	x	x				x	x
<i>Rhinolophus hipposideros</i>	x	x	x				

Sur base des cartes d'occupation de sol et la documentation du Parc naturel Burdinale-Mehaigne, les éléments suivants composent la troisième catégorie de la Trame Habitats :

- 23,9 ha de zones d'eau (surfaces et cours d'eau),
- 71 ha de vergers,
- 814 ha de forêts,
- 1724 arbres têtards

La catégorie 3 a une superficie totale de 908,9 hectares.

2.2. Modéliser la situation actuelle

La base de données étant établie, il est maintenant possible de modéliser la situation actuelle. Cette étape consiste à modéliser la Trame Lumière actuelle sur le territoire d'étude et de la confronter à la Trame Biodiversité. L'objectif est d'identifier et comprendre l'impact actuel de l'éclairage sur la fragmentation du paysage nocturne.

L'analyse se réalise sur deux temporalités : en début de nuit (20h) ainsi qu'en cœur de nuit (00h00). Les politiques d'extinction et de dimming sont prises en compte.

Les relevés de chiroptères utilisés datent de 2016 et 2017, et ont donc été réalisés avant le début de la transition vers un éclairage LED :

- Début de transition de l'éclairage routier : 2020, sur la commune de Burdinne
- Début de transition de l'éclairage autoroutier : 2019-2020.

Pour cette raison, la modélisation de la Trame Lumière actuelle ne prendra pas en compte les éclairages LEDs installés en 2019-2020, mais le type de lampe qu'ils remplacent (lampes Sodium Basse Pression pour Burdinne, lampes Sodium Haute Pression pour les autoroutes).

Pour modéliser la Trame Lumière, les deux étapes suivantes sont réalisées :

- Les relevés des lampadaires de la trame lumineuse principale se voit attribuer une surface (zone tampon). Celle-ci correspond à la largeur du halo lumineux mesuré *in situ* pour chaque type de lampes.
- Les émissions lumineuses déduites de l'ortho-photographie nocturne sont prises en compte.

Afin d'évaluer la fragmentation du paysage nocturne pour la biodiversité, deux approches sont utilisées.

Dans un premier temps, nous estimons la superficie de la Trame Habitats rendue indisponible par la lumière. Cette indisponibilité se définit à partir des caractéristiques des espèces de chiroptères lucifuges : les éclairages concernés sont ceux possédant un spectre lumineux polychromatique (Sodium Haute Pression, Vapeur de Mercure et LED).

Nous distinguons ici deux types de pertes de superficies (Figure 24) :

- Perte directe : superficie correspondant au halo lumineux autour de l'éclairage
- Perte indirecte : superficie rendue indisponible car entourée d'éclairages

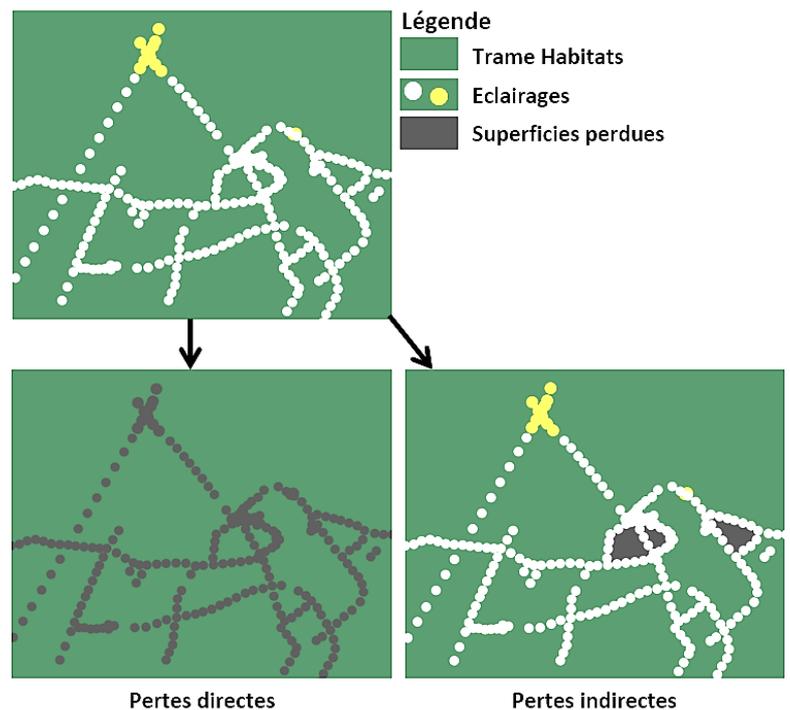


Figure 24: Schéma de détermination des pertes potentielles de territoire liées à la lumière. Source : Charlotte Angerand

Dans un second temps, nous estimons le nombre de fractures au sein de la Trame Biodiversité. Nous définissons les fractures comme des alignements d'éclairages supposés infranchissables pour la biodiversité.

Nous entendons par infranchissable :

- Impossibilité de traverser l'alignement d'éclairages (les halos lumineux se superposent)
- Impossibilité de contourner au sein de la Trame Biodiversité

La lumière « fragmentante » est définie par les caractéristiques des espèces lucifuges (de chiroptères). Cela signifie que les sources d'éclairage considérées sont les lampes polychromatiques (SHP, Vapeur de mercure ou LED).

Les fractures lumineuses sont recherchées sur la Trame Habitats ainsi que sur la Trame Espèces. Elles correspondent aux alignements d'éclairages polychromatiques infranchissables (Figure 25) :

- Traversant de part en part la Trame Habitats
- Traversant de part en part les liaisons écologiques
- Isolant un gîte de chiroptères de la Trame Habitats

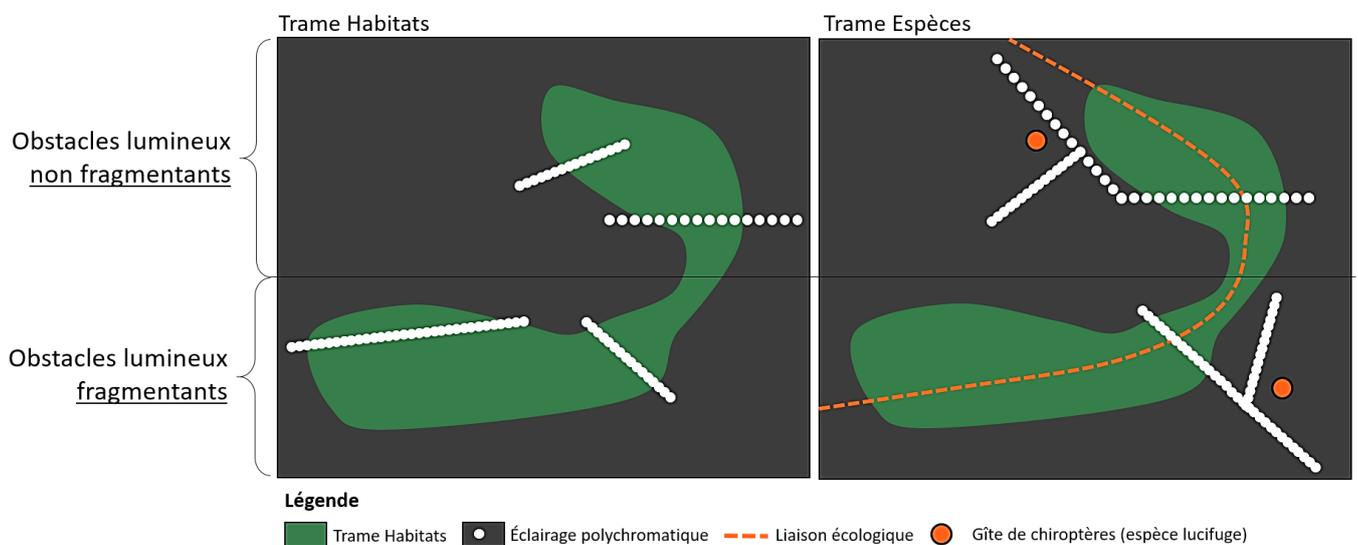


Figure 25 : Schéma explicatif de la fragmentation de la Trame Biodiversité par la lumière. Source : Charlotte Angerand

2.3. Modéliser un scénario futur

Cette étape consiste à modéliser la Trame Lumière de 2030, après une transition complète de l'éclairage public vers les LEDs. L'objectif est d'identifier le futur impact de l'éclairage sur la biodiversité, et donc d'anticiper la fragmentation du paysage nocturne du Parc.

Pour cela, le réseau d'éclairage public est entièrement converti par des LEDs sur logiciel SIG, en se basant sur les caractéristiques connues des LEDs actuelles (température, flux lumineux en Lux). Les luminaires des autoroutes mentionnés dans le projet LuWa sont également convertis en LEDs, les non-mentionnés sont conservés comme lampes Sodium Haute Pression.

Les lampadaires et surfaces lumineuses identifiés à partir de l'ortho-photographie nocturne sont conservés, identiques à la situation actuelle.

Les données fournies par les communes sont également prises en considération, notamment l'installation du dimming des LEDs.

La méthodologie appliquée est la même que celle présentée pour la situation actuelle. La Trame Lumière se décline en deux temporalités : début de nuit (20h), et cœur de nuit (00h00).

La confrontation de cette future Trame Lumière à la Trame Biodiversité est étudiée de la même façon que pour la situation actuelle afin d'estimer la perte et la fragmentation de la Trame Habitats.

2.4. Evaluer l'évolution de la fragmentation du paysage nocturne pour la biodiversité

Cette étape consiste à vérifier la véracité de l'hypothèse n°1 : « La transition de l'éclairage traditionnel vers les LEDs va augmenter la fragmentation du paysage nocturne pour la biodiversité ».

Pour cela, une analyse comparative de la situation actuelle et du scénario 2030 est réalisée.

2.5. Identifier les points de conflit entre éclairage et biodiversité dans le scénario futur

Dans cette partie nous nous intéressons à l'impact de l'éclairage à l'échelle du lampadaire. Cette étape a pour objectif d'identifier les poteaux d'éclairage en conflit avec la biodiversité du Parc.

L'identification des points de conflit se base sur la Trame Lumière du scénario 2030. La transition de l'éclairage du Parc pour les LEDs étant déjà décidée et organisée, l'identification prévisionnelle des conflits semble plus pertinente. Cette étape est réalisée sur les deux temporalités étudiées : début et cœur de nuit.

Les points de conflit correspondent à une superposition de la Trame Lumière et de la Trame Biodiversité. Cette démarche doit permettre d'identifier les éléments suivants :

- Eclairages de la trame lumineuse principale dont le halo se superpose à la Trame Biodiversité
- Emissions (hors trame lumineuse principale) présentes sur la Trame Biodiversité

2.6. Analyse des points de conflit

Les points de conflit entre éclairage et biodiversité précédemment identifiés doivent être hiérarchisés : ils n'ont pas tous le même impact. Cela permet, à finalité, d'établir un planning d'action pour les acteurs du territoire avec des priorités bien définies.

Un ordre hiérarchique est défini pour les différents éléments intervenant dans les conflits éclairage-biodiversité, présenté dans le Tableau 11. Les éléments prioritaires sont définis à partir de la bibliographie étudiée au début de ce rapport.

Tableau 11 : Hiérarchie des composantes des conflits éclairage-biodiversité. Source : Charlotte Angerand

Priorité	Trame Lumière		Trame Biodiversité		Horaire
	Type d'émission	Type de lampe	Trame Habitats	Trame Espèces	
+	Bleue	LED	Catégorie 1	Espèces lucifuges	Début de nuit
	Verte	Sodium Haute Pression	Catégorie 2	Espèces tolérantes	Cœur de nuit
-	Rouge		Catégorie 3		

Notons que les points de conflit avec les éclairages des autoroutes du Parc sont un cas particulier. Le projet LuWa s'est engagé à ce que les halos des nouveaux luminaires LED n'atteignent pas les zones Natura 2000. Pour cette raison, les points de conflit correspondants ne seront pas approfondis dans notre étude.

2.7. Définir des typologies d'espaces

Nous connaissons les lampadaires néfastes pour la biodiversité ainsi que ceux devant être traités en priorité. Il semble cependant judicieux de ne pas entamer d'actions sur l'éclairage à cette échelle (du lampadaire).

Cette dernière étape vise à regrouper les lampadaires précédemment identifiés en fonction d'une typologie d'espaces que nous devons définir. Cela permet d'amorcer une approche paysagère au niveau du Parc naturel, en abordant la problématique de l'éclairage par la création d'ambiances paysagères nocturnes. Les bénéfices recherchés par cette approche sont les suivants :

- Avoir un éclairage le moins néfaste possible pour la biodiversité
- Créer une identité paysagère nocturne au sein du Parc naturel Burdinale-Mehaigne en associant une ambiance paysagère par type d'espace

L'objectif de cette étape est d'apporter une démarche cohérente sur l'ensemble du territoire du Parc naturel, en prenant en compte la biodiversité ainsi que les populations humaines.

La typologie d'espaces utilisée se base sur la charte paysagère du Parc. Nous sélectionnons les espaces composants la structure urbanisée (bâti et réseau de mobilité) du Parc, plus susceptibles d'être éclairés la nuit. Nous décidons ici de distinguer :

- Des structures dominantes des villages (cœur de village, place centrale)
- Des quartiers périphériques
- Des entrées/sorties de villages
- Des axes principaux
- Des axes secondaires (comprenant les routes reliant les villages entre eux)

Une cartographie reprenant la typologie d'espaces est réalisée, et utilisée pour analyser et regrouper les points de conflit. Nous cherchons ici à identifier les points de conflits de superposant aux espaces précédemment définis afin de les quantifier.

Résultats

1. Modélisation de la situation actuelle

Cette partie comprend les résultats obtenus pour l'étude de la situation actuelle.

Il s'agit dans un premier temps des cartes de simulation de la Trame Lumière, déclinées en deux temporalités (début et cœur de nuit), ainsi que la carte de modélisation de la Trame Biodiversité. Dans un second temps, les résultats sur la fragmentation du paysage nocturne pour la faune sont présentés.

1.1. Trame Lumière actuelle

La modélisation de la Trame Lumière de la situation actuelle est représentée sur la Figure 26. Ces cartes sont également disponibles en Annexe 2.

Notons que la modélisation de la carte se base sur les couleurs de la lumière émise par type d'éclairage.

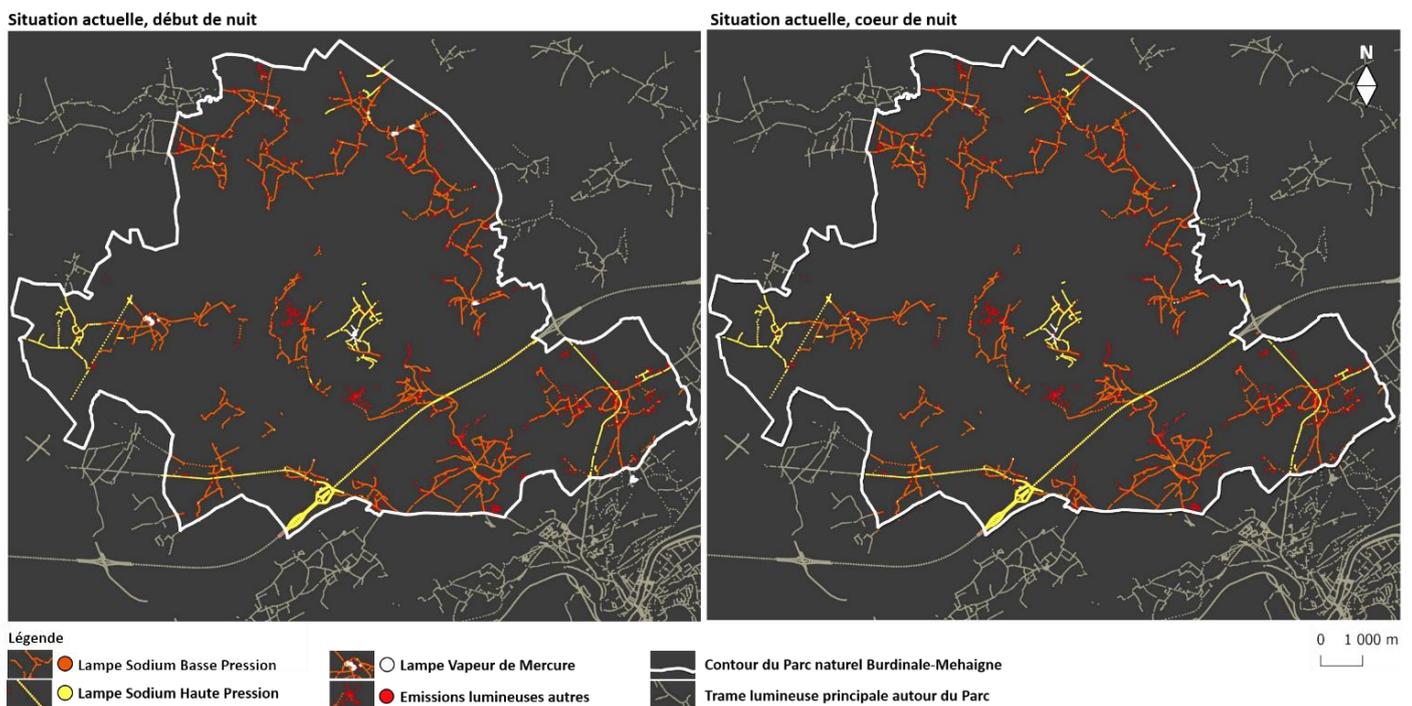


Figure 26 : Modélisation de la Trame Lumière, situation actuelle. Source : Charlotte Angerand

La modélisation de la trame lumineuse principale repose sur les résultats des relevés de terrain pour connaître l'emprise du halo de chaque type d'éclairage. Les halos lumineux (supérieurs à 1 lux), en fonction du type d'éclairage sont les suivants :

- Sodium Basse Pression : 20 m de rayon
- Sodium Haute Pression : 20 m de rayon
- Vapeur de Mercure (hauteur < 6m) : 40 m de rayon
- Vapeur de Mercure (hauteur > 6m) : 20 m de rayon
- LED : 20 m de rayon
- Sodium Haute Pression (autoroute) : 25 m de rayon

Les résultats des relevés sont disponibles en Annexe 1. La trame lumineuse principale représente l'éclairage fourni par les 4568 éclairages du réseau public, ainsi que les 465 luminaires des autoroutes.

Les émissions lumineuses identifiées par ortho-photographie nocturne sont également prises en compte. La Figure 27 présente les surfaces non comprises dans la trame lumineuse principale et émettant dans les canaux rouge, vert et bleu. Sur base d'une analyse cartographique, les émissions sont classées en 7 catégories.

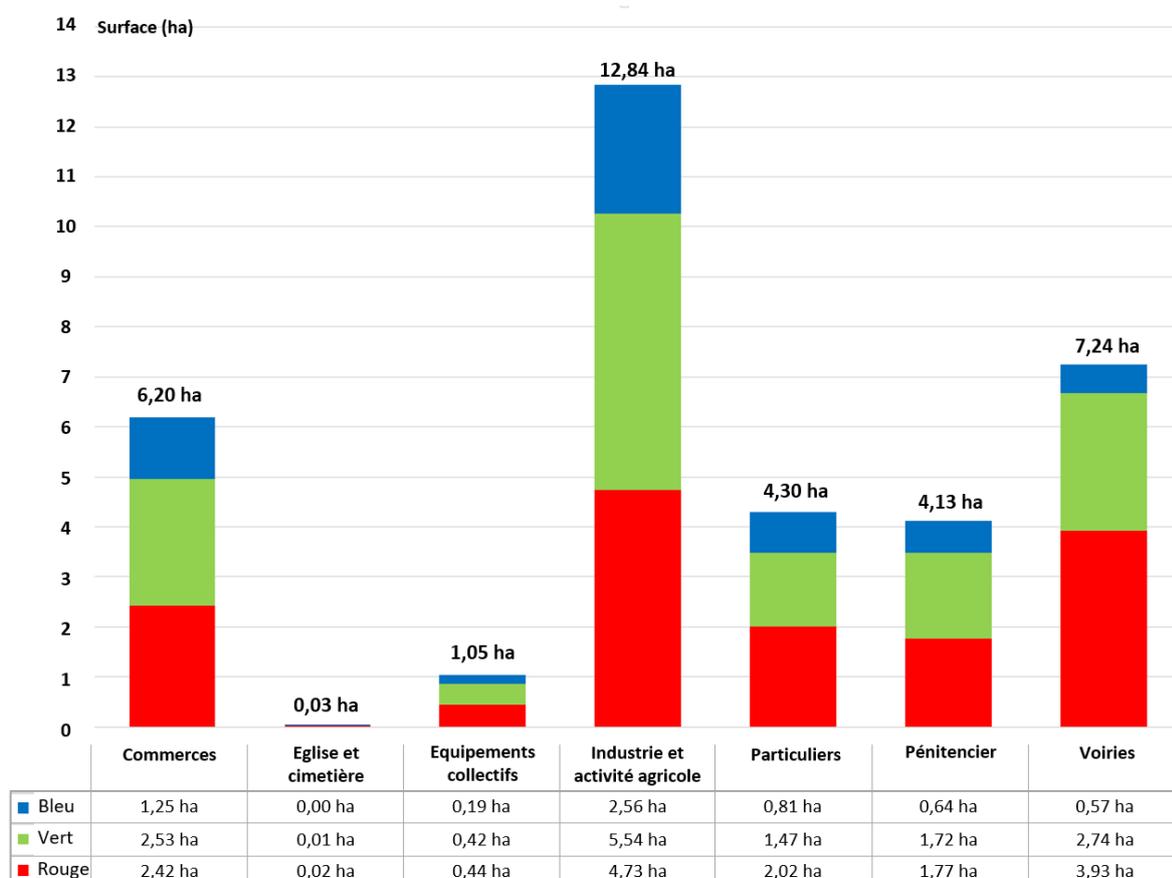


Figure 27 : Surfaces lumineuses par catégories selon les canaux rouge, vert et bleu. Source : Charlotte Angerand

Au total 35,78 ha du Parc naturel sont éclairés, en plus du réseau principal précédemment évoqué. Le détail des résultats obtenus, notamment la distinction entre les luminaires identifiés et les surfaces lumineuses, sont disponibles en Annexe 3.

Les émissions bleues ne représentent que 16,85% des émissions nocturnes, contre 40,30% pour les émissions vertes et 42,85% pour les émissions rouges.

La Figure 27 montre que les sources de lumière principales (3 canaux confondus) sont l'industrie et les activités agricoles, regroupant environ 36% des émissions totales du Parc. C'est également cette catégorie qui émet le plus d'émissions dans le bleu, soit 42,45%. La carrière du Moha est en grande partie responsable de l'ensemble de ces émissions (Annexe 3).

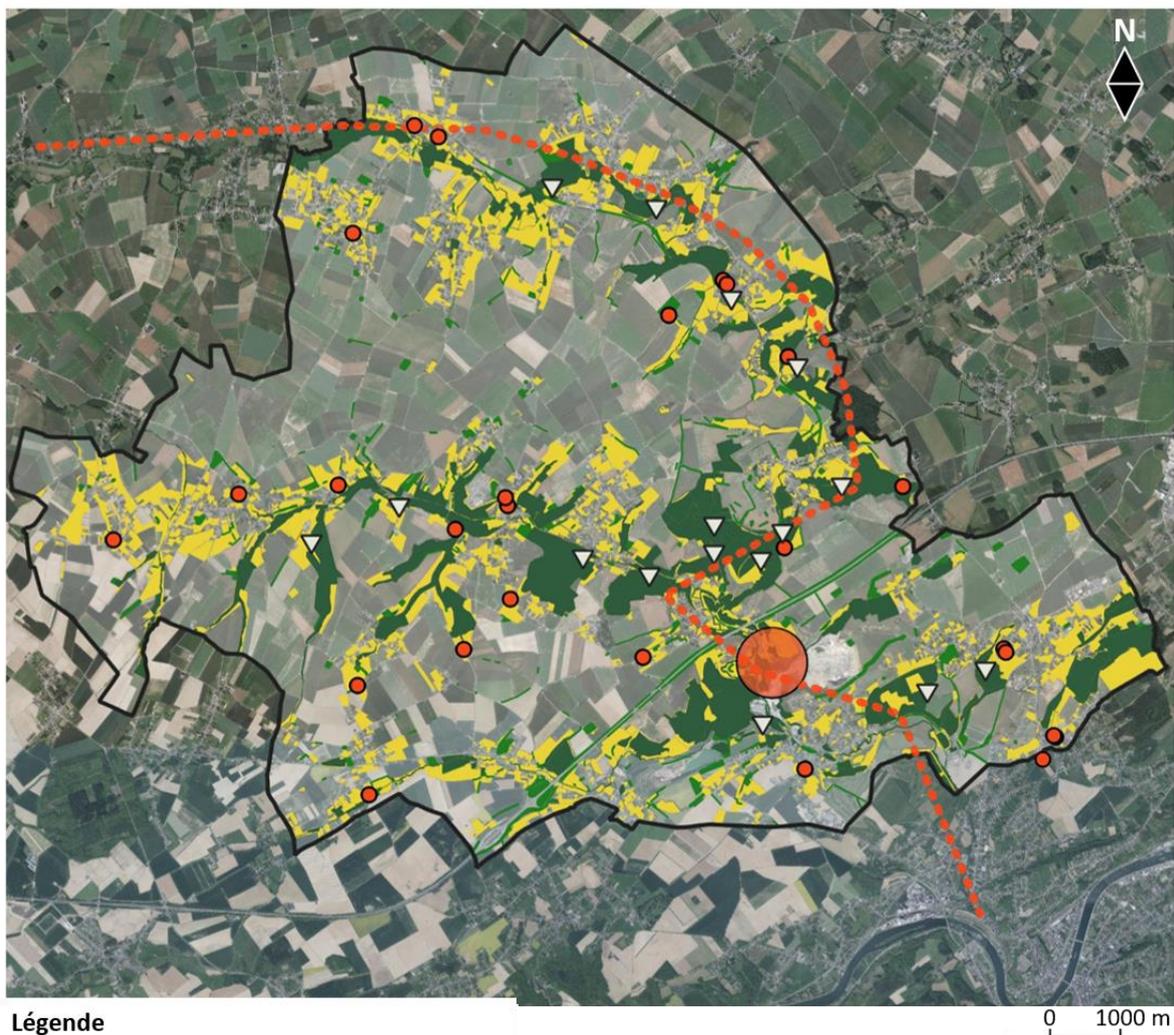
La seconde catégorie est l'éclairage de voirie (non répertorié dans la trame lumineuse principale), qui représente environ 20% des émissions totales du Parc. Un total de 439 luminaires a été identifié comme responsable de ces émissions (Annexe 3).

Nous retrouvons ensuite les commerces, responsables d'environ 17% des émissions totales, puis l'éclairage des particuliers (environ 12%), le pénitencier (11,5%), les équipements collectifs (3%), et les églises et cimetières (moins de 0,5%).

1.2. Trame Biodiversité

La Trame Biodiversité modélisée est présentée sur la Figure 28. Cette carte combine la Trame Habitats et la Trame Espèces. Le détail de ces deux sous-trames est disponible en Annexe 4.

La Trame Habitats du Parc naturel Burdinale-Mehaigne a une superficie de 2359,8 hectares. Nous remarquons que les relevés des gîtes de chiroptères sont tous à proximité de la Trame Habitats. Les points de contacts avec les chiroptères se superposent également à la trame.



Légende

Trame Habitats

- Catégorie 1
- Catégorie 2
- Catégorie 3

Trame Espèces

- Rhinolophus hipposideros*, 2017
- Point de contact avec des chiroptères, 2016.
- Relevé des gîtes estivaux de chiroptères, 2016.
- Liaison écologique

Figure 28 : Modélisation de la Trame Biodiversité. Source : Charlotte Angerand

1.3. Estimation de la fragmentation du paysage nocturne

Cette partie vise à quantifier la perte de surface au sein de la Trame Habitats, ainsi que le nombre de fractures dues à l'éclairage.

Dans la situation actuelle, les éclairages constituant des obstacles infranchissables pour les espèces de chauves-souris lucifuges sont les lampes Sodium Haute Pression ainsi que les Vapeur de Mercure.

Une simulation de la perte de superficie de la Trame Habitats liée à la lumière donne des résultats (Figure 29) proches pour le début et le cœur de nuit (respectivement 76,9 ha et 75,7 ha de perte totale).

La Figure 29 montre que les pertes indirectes de surface sont équivalentes au cours de la nuit. Seule la perte directe de surface dans la catégorie 3 de la Trame Habitats diffère, supérieure de 1,2 ha en début de nuit. Cela est dû à l'extinction de certains éclairages, à l'initiative des communes, présentée dans la partie Matériels et Méthodes.

De plus, dans les 2 cas, les pertes indirectes sont plus élevées (environ le double) que les pertes directes :

- Début de nuit : 51,1 ha de pertes indirectes pour 25 ha de pertes directes
- Cœur de nuit : 51,1 ha de pertes indirectes pour 24,6 ha de pertes directes

Cela signifie que les plus grandes pertes de surfaces sont dues à l'agencement des éclairages dans l'espace (et notamment à leur proximité), plutôt qu'au simple halo de lumière qu'ils génèrent.

La Figure 29 montre également que les plus grandes pertes (directes et indirectes confondues) concernent la catégorie 3 de la Trame Habitats, soit environ 84% de la surface perdue dans les deux cas. En deuxième position nous retrouvons la catégorie 2 qui représente environ 11 % des pertes totales, puis la catégorie 1 pour 5% environ.

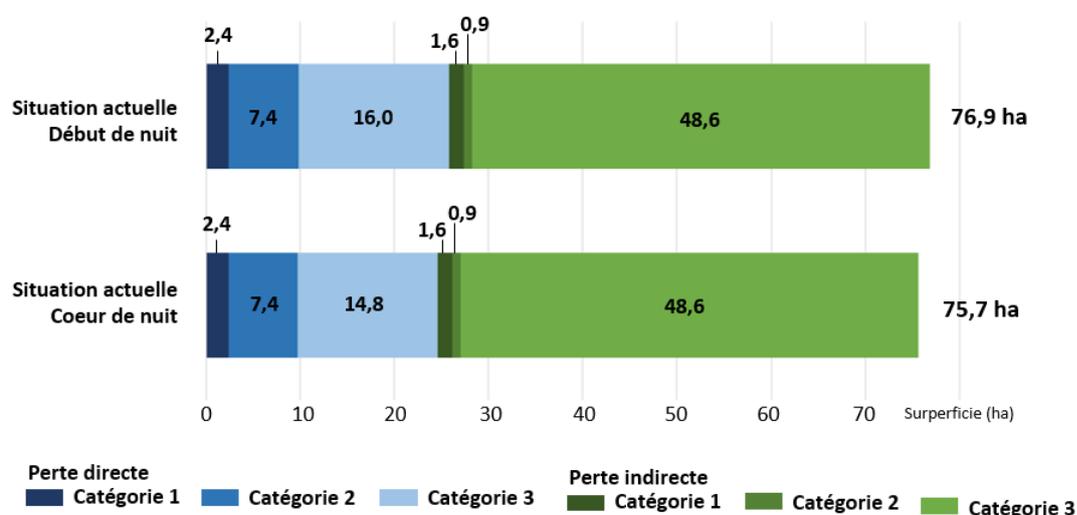


Figure 29 : Surfaces perdues de la Trame Habitats dû à la Trame Lumière actuelle. Source : Charlotte Angerand

Concernant la fragmentation de la Trame Biodiversité, le nombre de fractures lumineuses et gîtes de chiroptères isolés est comptabilisé.

Comme montrent les cartes de la Figure 30, nous observons 2 fractures lumineuses sur le Parc en début et cœur de nuit.

Parmi les gîtes de chiroptères sélectionnés dans cette partie (espèces lucifuges), un seul subit un isolement de la Trame Habitats en début de nuit. Une seule espèce, *Plecotus sp.*, est concernée. Cet isolement est dû aux éclairages de lampes Vapeur de Mercure, dont l'extinction est planifiée à minuit.

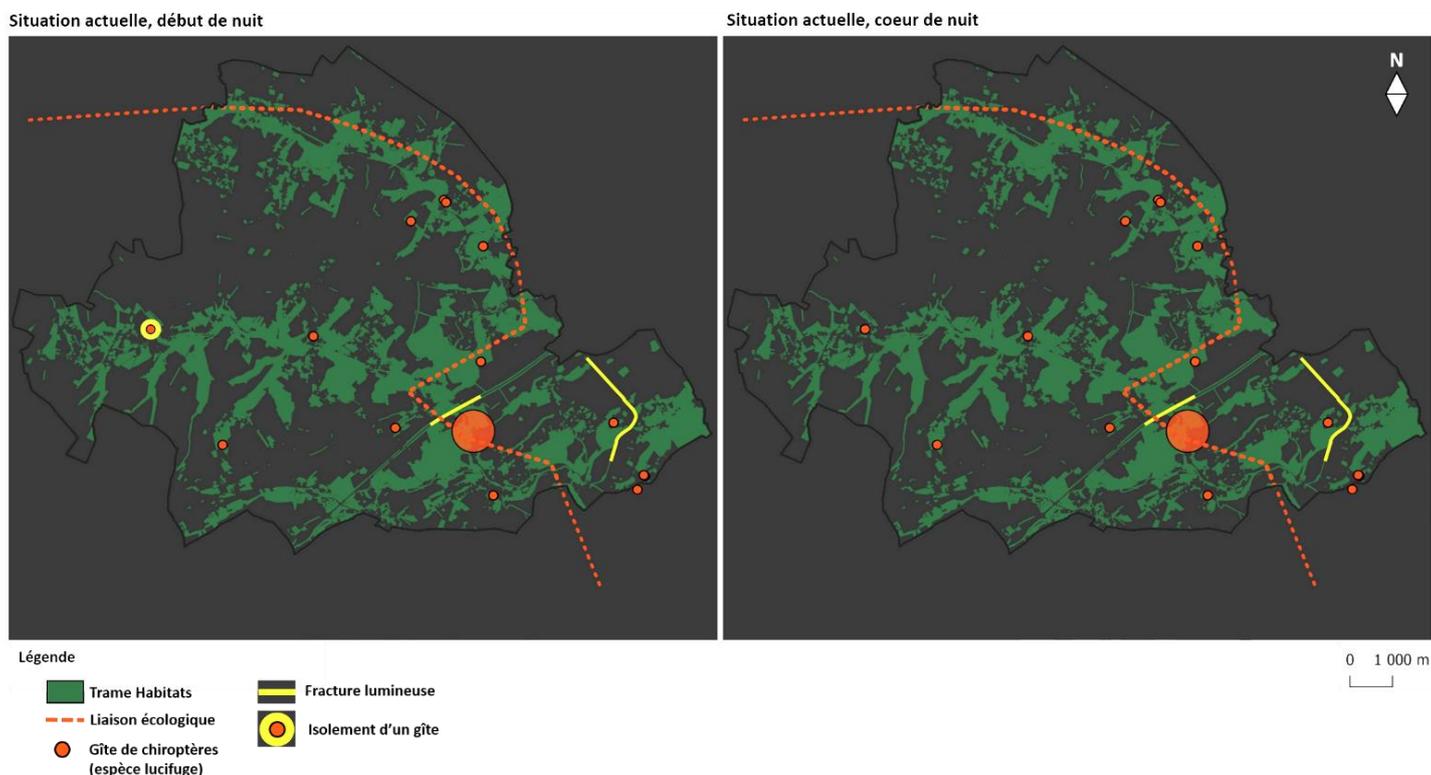


Figure 30 : Modélisation des fractures lumineuses de la Trame Biodiversité face à la Trame Lumière actuelle. Source : Charlotte Angerand

2. Modélisation du scénario 2030

Cette partie comprend les résultats obtenus pour l'étude du scénario 2030.

Il s'agit dans un premier temps des cartes de simulation de la Trame Lumière, déclinées en deux temporalités (début et cœur de nuit). Notons que la Trame Biodiversité utilisée pour ce scénario est celle de la situation actuelle (voir partie précédente).

Dans un second temps, les résultats sur la fragmentation du paysage nocturne pour la faune sont présentés.

2.1. Trame Lumière 2030

La modélisation de la Trame Lumière du scénario 2030 est représentée sur la Figure 31. Ces cartes sont également disponibles en Annexe 5.

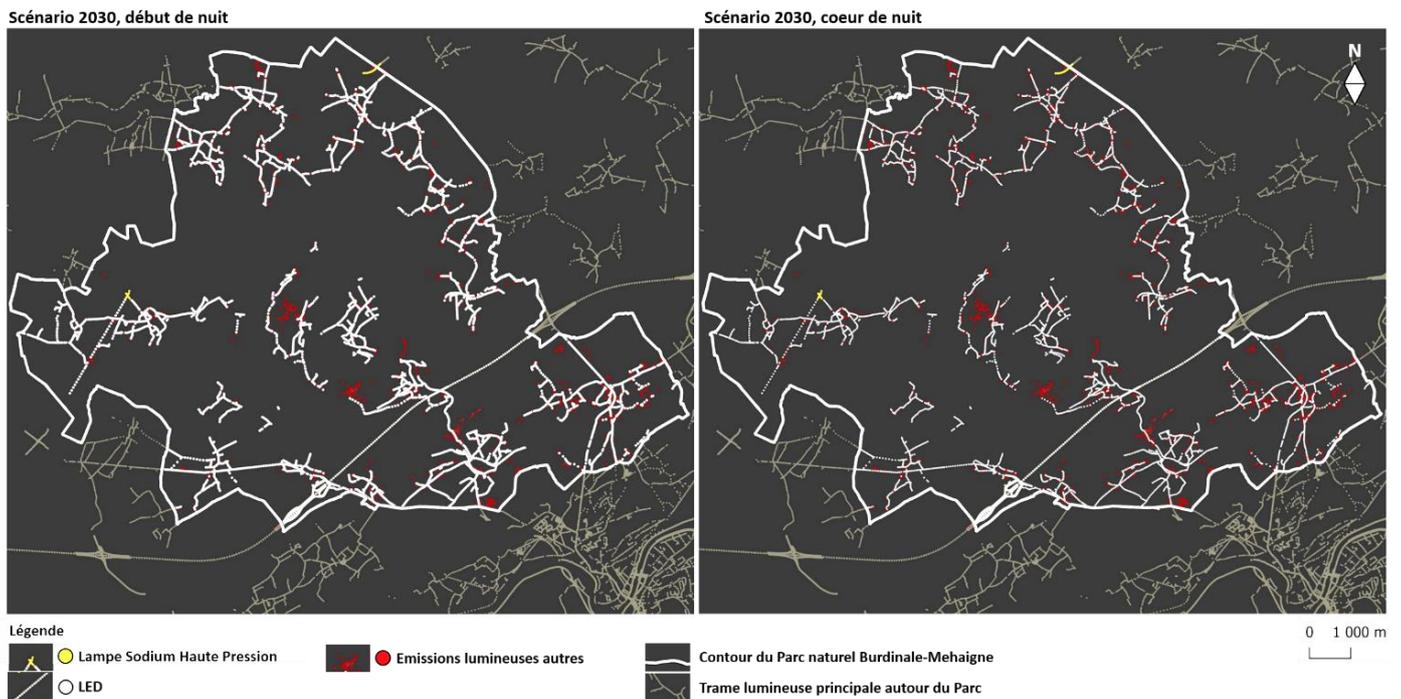


Figure 31 : Modélisation de la Trame Lumière, scénario 2030. Source : Charlotte Angerand

La modélisation de la trame lumineuse principale repose sur les résultats des relevés de terrain pour connaître l'emprise du halo de chaque typologie d'éclairage. Les halos lumineux (supérieurs à 1 lux), en fonction du type d'éclairage sont les suivants :

- LED : 20 m de rayon
- Sodium Haute Pression (autoroute) : 25 m de rayon

Notons que les relevés sur les éclairages LEDs déjà en place sur le terrain ont été réalisés pendant le dimming (50% de puissance). En prenant en compte l'aspect linéaire de la relation puissance-flux lumineux des LEDs présenté dans l'étude bibliographique, nous représenterons le doublement du flux par l'approximation d'un doublement de rayon.

Concernant les luminaires dits « d'autoroute », ceux mentionnés dans le projet LuWa sont convertis en LED mais la dimension du halo lumineux est conservée à 25m, faute de relevés et d'informations disponibles. Les éclairages non mentionnés dans le projet LuWa sont gardés en lampe Sodium Haute Pression avec un halo de 25m de rayon, comme évalué pour la situation actuelle.

Ainsi, la Trame Lumière du scénario 2030 comprend :

- 4568 éclairages du réseau public du Parc convertis en LEDs,
- 465 luminaires d'autoroutes dont 53 sont conservés en tant que lampes Sodium Haute Pression, et 412 convertis en LEDs.

Les émissions lumineuses déduites à partir de l'ortho-photographie nocturne sont les mêmes qu'utilisée dans la modélisation de la situation actuelle.

2.2. Estimation de la fragmentation du paysage nocturne

Dans ce scénario de transition de l'éclairage, les lampes Sodium Haute Pression ainsi que les LEDs sont des obstacles infranchissables pour les espèces de chauves-souris lucifuges, car polychromatiques.

Une simulation de la perte de superficie de la Trame Habitats liée à la lumière donne des résultats (Figure 32) nettement différents pour le début et le cœur de nuit (respectivement 448,8 ha et 196,9 ha de pertes totales).

Concernant les pertes de surface de la Trame Habitats en début de nuit, la majorité concerne les pertes indirectes (57,2% des pertes totales). En regardant par catégorie, les résultats sont les suivants :

- Catégorie 3 : 78 % des pertes totales
- Catégorie 1 : 16,6 %
- Catégorie 2 : 5,4 %

Pour le cœur de nuit, les pertes directes et indirectes sont relativement proches (respectivement 97,5 ha et 99,5 ha). La catégorie 3 est une fois de plus la plus touchée, représentant 80,5% des pertes totales. En deuxième position nous retrouvons la catégorie 1 qui représente environ 10,1 % des pertes totales, puis la catégorie 2 pour 9,4% environ.

La perte de surface de la Trame Habitats est réduite de plus de moitié entre le début et le cœur de nuit. Ce résultat est cohérent avec la mise en place du dimming.

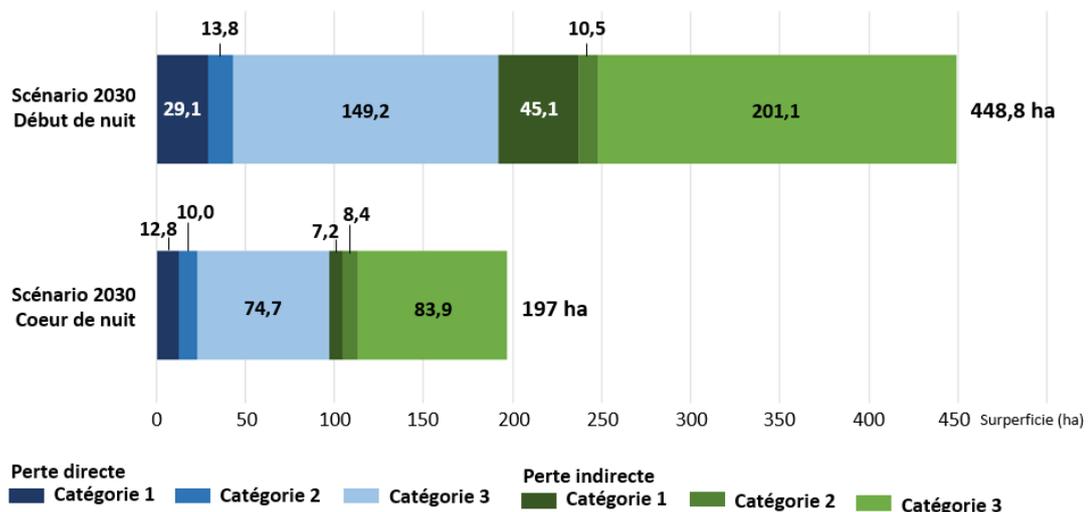


Figure 32 : Surfaces perdues de la Trame Habitats dû à la Trame Lumière du scénario 2030. Source : Charlotte Angerand

Concernant la fragmentation de la Trame Biodiversité, le nombre de fractures lumineuses et de gîtes de chiroptères isolés sont comptabilisés.

Comme montrent les cartes de la Figure 33, nous observons :

- En début de nuit : 10 fractures lumineuses, 5 gîtes isolés
- En cœur de nuit : 5 fractures lumineuses, 3 gîtes isolés

Les espèces concernées par l'isolement des gîtes sont *Plecotus sp.* et *Myotis sp.* et début et cœur de nuit.

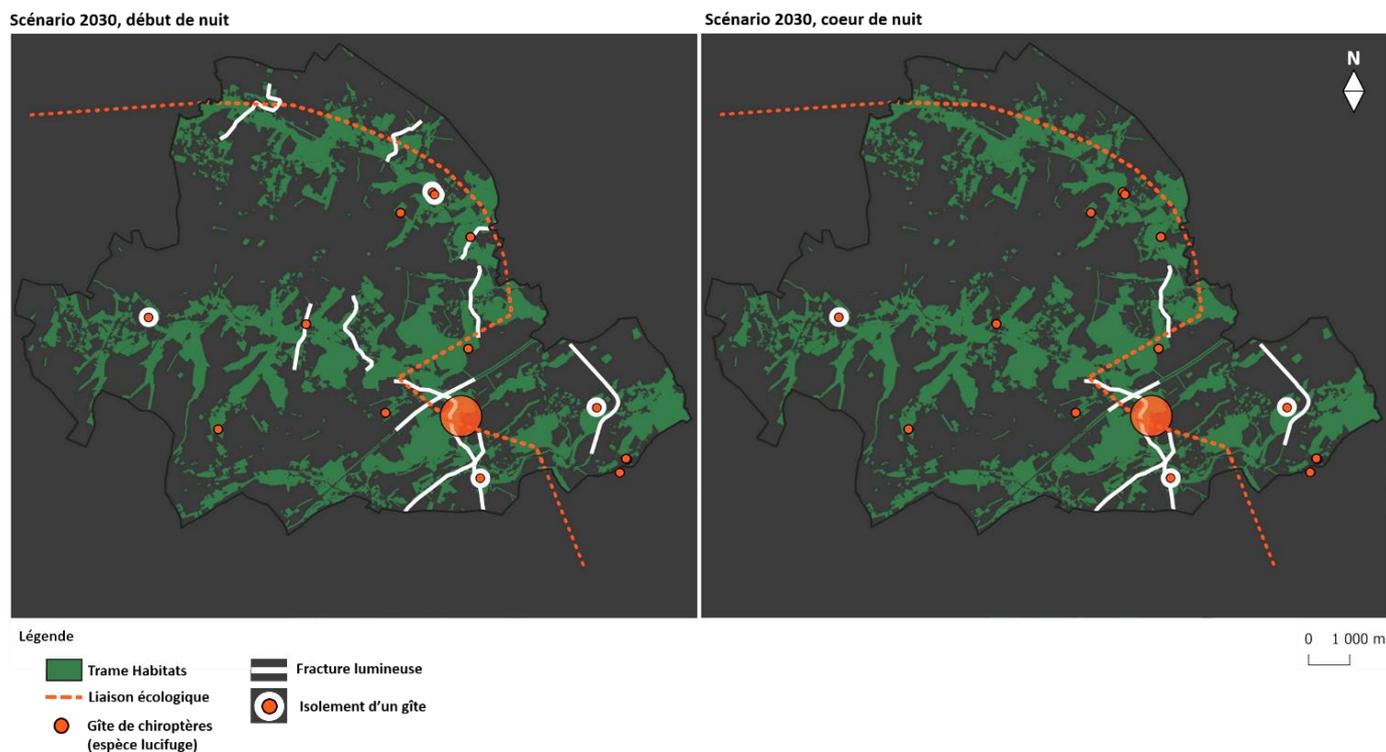


Figure 33 : Modélisation des fractures lumineuses de la Trame Biodiversité face à la Trame Lumière du scénario 2030. Source : Charlotte Angerand

3. Comparaison de la fragmentation du paysage nocturne pour la faune, situation actuelle et scénario 2030

En comparant les résultats obtenus pour les pertes de surfaces de la Trame Habitats dans la situation actuelle et pour un scénario 2030 (Figure 34), nous remarquons plusieurs éléments :

Tout d'abord, la superficie totale perdue est nettement plus élevée dans le scénario 2030. En effet, en début de nuit la superficie perdue pour la faune est presque 6 fois plus élevée que pour la situation actuelle. En cœur de nuit, la surface perdue a plus que doublé.

L'impact de l'éclairage sur les catégories de la Trame Habitats évolue avec la transition de l'éclairage. Tandis que 2,4 ha de la catégorie 1 sont touchés par la perte directe de surface dans la situation

actuelle (début et cœur de nuit), ce chiffre augmente jusqu'à 12,8 ha en cœur de nuit et 29,1 ha en début de nuit en 2030.

Enfin, la mise en place d'un dimming (cœur de nuit du scénario 2030) montre une diminution des pertes indirectes de surface, qui représentent alors « seulement » 50,5% de pertes totales contre 57,2% pour le début de nuit du scénario 2030, et 67% pour la situation actuelle (début et cœur de nuit).

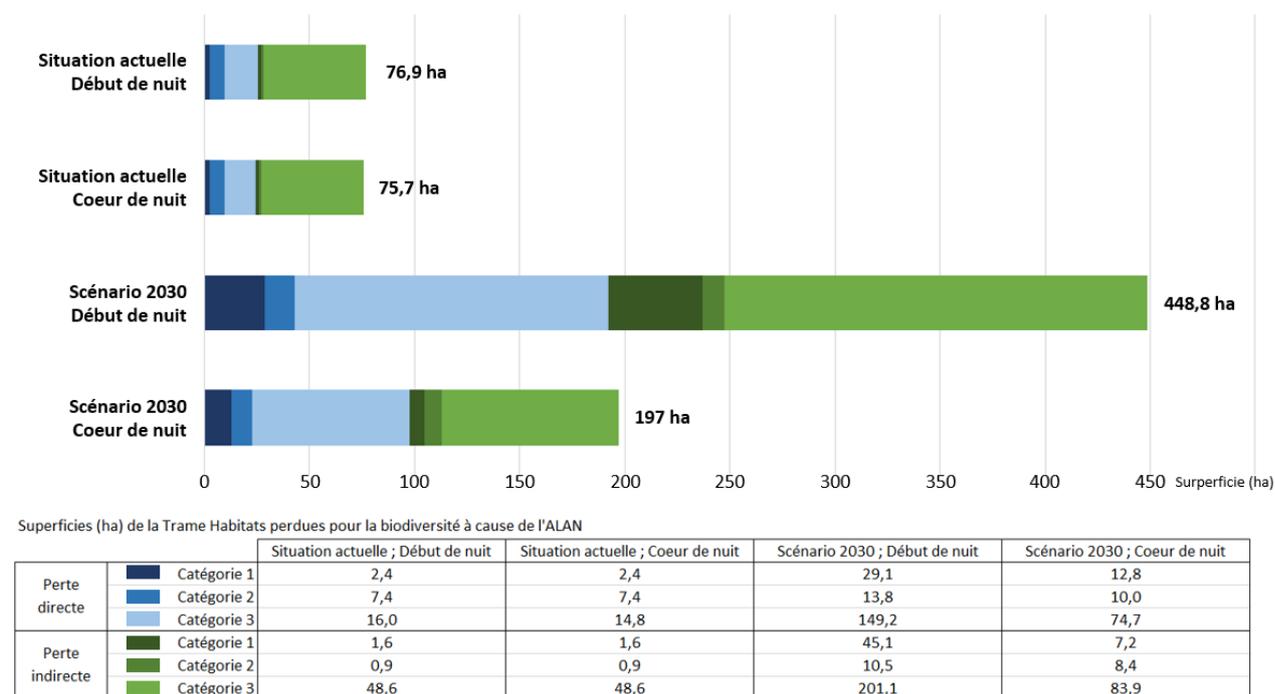


Figure 34 : Graphique comparatif des surfaces perdues de la Trame Biodiversité dû à la Trame Lumière actuelle et du scénario 2030. Source : Charlotte Angerand

En comparant ces résultats à la superficie totale de la Trame Habitats (2359,8 ha), le pourcentage de superficie de la trame perdue pour la faune est :

- Situation actuelle, début de nuit : 3,2 %
- Situation actuelle, cœur de nuit : 3,2 %
- Scénario 2030, début de nuit : 19,0 %
- Scénario 2030, cœur de nuit : 8,4 %

Concernant le nombre de fractures lumineuses de la Trame Biodiversité (prenant en compte les gîtes de chiroptères isolés par la lumière et les linéaires d'éclairages fragmentant la Trame Habitats), nous observons (Figure 35):

Pour la situation actuelle et le scénario 2030, le début de nuit présente plus de fractures pour la biodiversité que le cœur de nuit.

L'impact sur la biodiversité est multiplié par 5 (pour les deux composantes étudiées) dans le scénario 2030 en début de nuit, et par 4 en cœur de nuit.

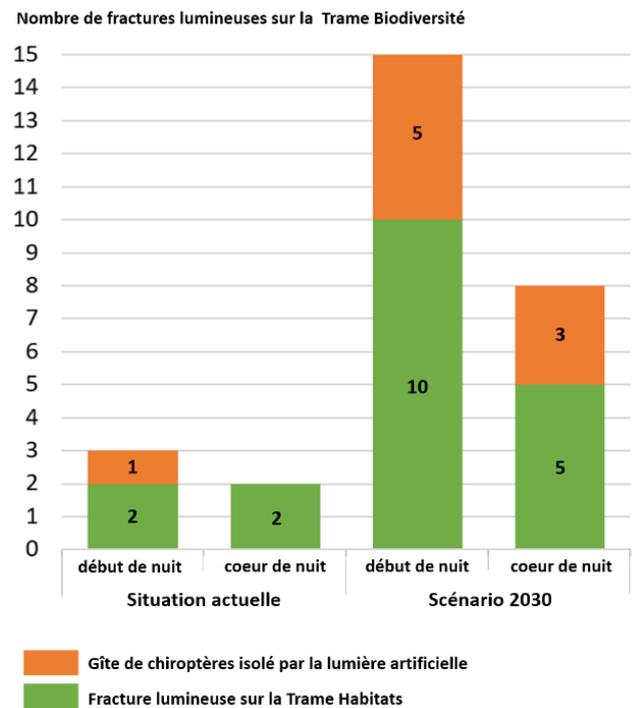


Figure 35 : Graphique de comparaison du nombre de fractures lumineuses sur la Trame Biodiversité, entre la situation actuelle et le scénario 2030. Source : Charlotte Angerand

4. Identification et analyse des points de conflit

Cette partie concerne l'identification et l'analyse des conflits à l'échelle du luminaire. Il s'agit de quantifier les lampadaires se superposant à la Trame Biodiversité, puis les hiérarchiser en fonction de leur impact sur la biodiversité. La hiérarchisation repose sur les catégories de la Trame Habitats. Cette analyse se base sur le scénario 2030, après une transition complète vers l'éclairage LED :

- 4568 éclairages du réseau public du Parc convertis en LEDs,
- 465 luminaires d'autoroutes dont 53 sont conservés en tant que lampes Sodium Haute Pression, et 412 convertis en LEDs.

Le Tableau 12 montre un total de 2463 luminaires conflictuels avec la biodiversité en début de nuit. Cela représente environ 54% du réseau public du Parc. Sur les 53 luminaires Sodium Haute Pression des autoroutes étudiés, 14 sont conflictuels, soit environ 26%.

En cœur de nuit, environ 50% des luminaires sont conflictuels pour la biodiversité.

Comme le montre le Tableau 12, la catégorie 3 de la Trame Habitats est la plus touchée par l'éclairage. En début de nuit, un total de 2276 luminaires se superpose à la catégorie 3. Nous comptabilisons 483 luminaires en conflit avec la catégorie 1, ainsi que 255 avec la catégorie 2.

Nous observons également sur ce Tableau que de nombreux luminaires sont en conflit avec plusieurs catégories de la Trame Habitats à la fois. Notons que parmi les points de conflit, 2% concernent les 3 catégories à la fois.

Tableau 12: Synthèse des points de conflit éclairage-biodiversité pour le scénario 2030. Source : Charlotte Angerand

Nombre de luminaires en conflit avec la Trame Habitats

Catégorie(s)	Début de nuit		Coeur de nuit	
	Réseau public LEDs	Autoroute SHP	Réseau public LEDs	Autoroute SHP
1 ; 2 ; 3	49	0	43	0
1 ; 2	15	0	13	0
1 ; 3	330	0	283	0
1	89	0	89	0
2 ; 3	108	3	106	3
2	83	6	75	6
3	1789	5	1686	5
Nombre total	2463	14	2295	14

Des émissions lumineuses identifiées sur l'ortho-photographie nocturne entrent également en conflit avec la Trame Biodiversité. La Figure 36 présente les surfaces lumineuses (rouges, vertes et bleues) se superposant aux catégories de la Trame Habitats. Le détail est disponible en Annexe 6.

Au total, les conflits biodiversité-émissions lumineuses représentent 24 911,0 m², soit 7% des émissions identifiées sur le Parc.

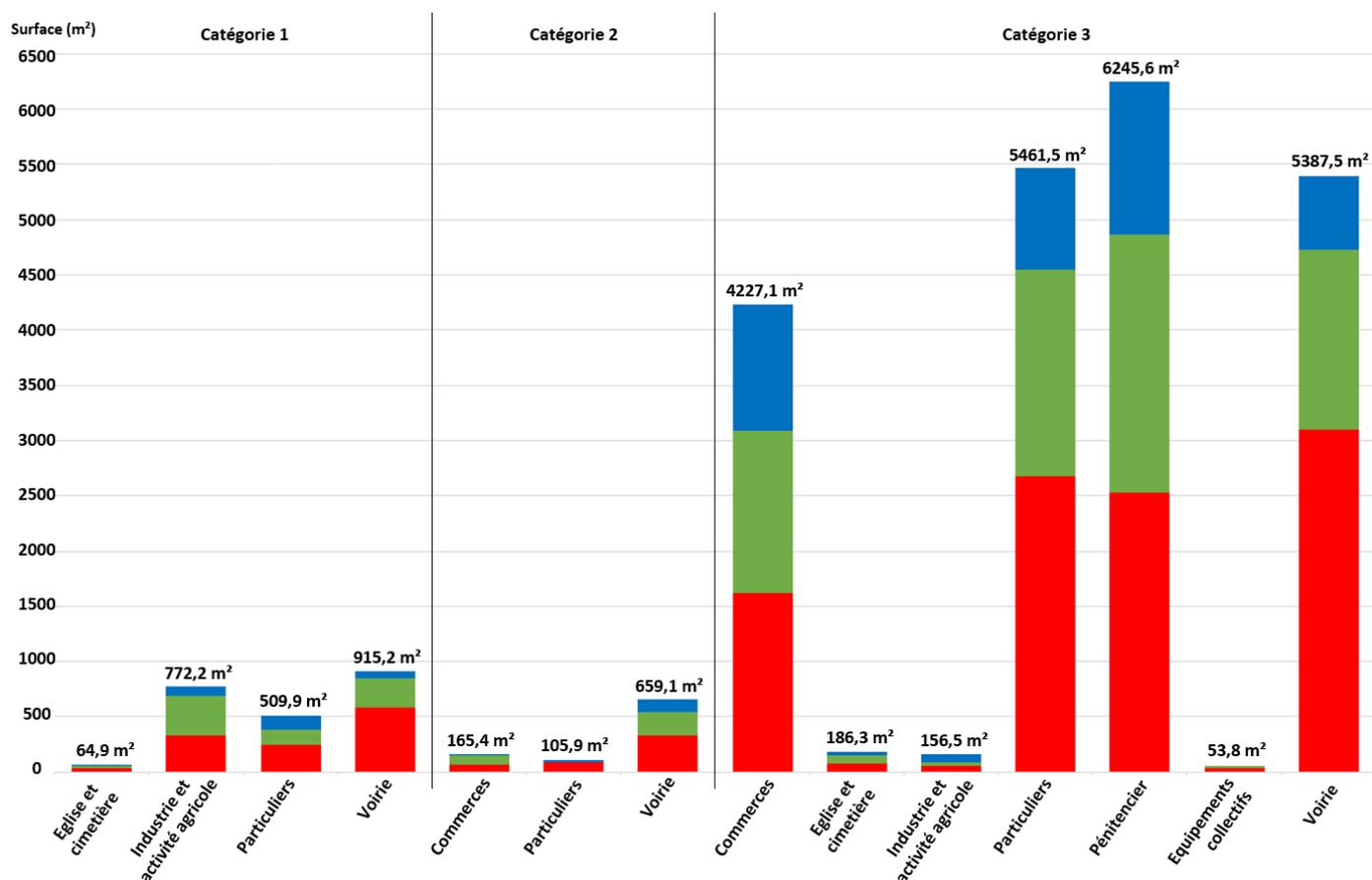


Figure 36 : Graphiques des surfaces lumineuses (canaux rouge, vert et bleu) sur la Trame Habitats et selon les catégories établies. Source : Charlotte Angerand

Nous remarquons que la catégorie 3 de la Trame Habitats est la plus touchée par les émissions, avec 21 718,3 m², contre 930,4 m² pour la catégorie 2 et 2262,2 m² pour la catégorie 1.

Les émissions rouges sont les plus représentées avec une surface totale de 11 773,1 m² se superposant à la Trame Habitats. Nous retrouvons ensuite les émissions vertes, avec 8 521,1 m², puis les émissions bleues avec 4 616,8 m².

Les émissions associées aux voiries sont celles entrant le plus en conflit avec la biodiversité, avec une surface totale de 6 961,8 m², soit environ 28% des émissions conflictuelles du Parc. Environ 13% de ces émissions impactent la catégorie 1 de la Trame Habitats, 9,5% la catégorie 2 et 77,5% la catégorie 3.

Le pénitencier est la seconde plus grande source d'émissions (tous canaux compris) avec 6 245,7 m², soit 25% des émissions totale du Parc. Celles-ci ne concernent que la catégorie 3 de la Trame Habitats. Le pénitencier est la source principale des émissions bleues sur le Parc.

Les éclairages des particuliers sont la troisième source d'émissions du Parc en conflit avec la biodiversité avec 6077,3 m² se superposant à la Trame Habitats, représentant 24,4% des émissions identifiées sur le Parc. Leurs impacts s'étendent sur les 3 catégories de la Trame Habitats.

Les commerces représentent environ 17,6% des émissions conflictuelles du Parc (4 392,4 m²). Parmi elles, 3,8% atteignent la catégorie 2, et 96,2% la catégorie 3.

Les industries/activités agricoles, les églises et cimetières, ainsi que les équipements collectifs présentent moins de surfaces conflictuelles avec respectivement 928,8 m², 251,2 m² et 53,8 m² de conflit biodiversité-émissions lumineuses.

5. Regroupement des points de conflit par typologie d'espaces

La typologie d'espaces présentée dans la partie Matériels et Méthodes est modélisée, et nous obtenons la carte de la Figure 37.

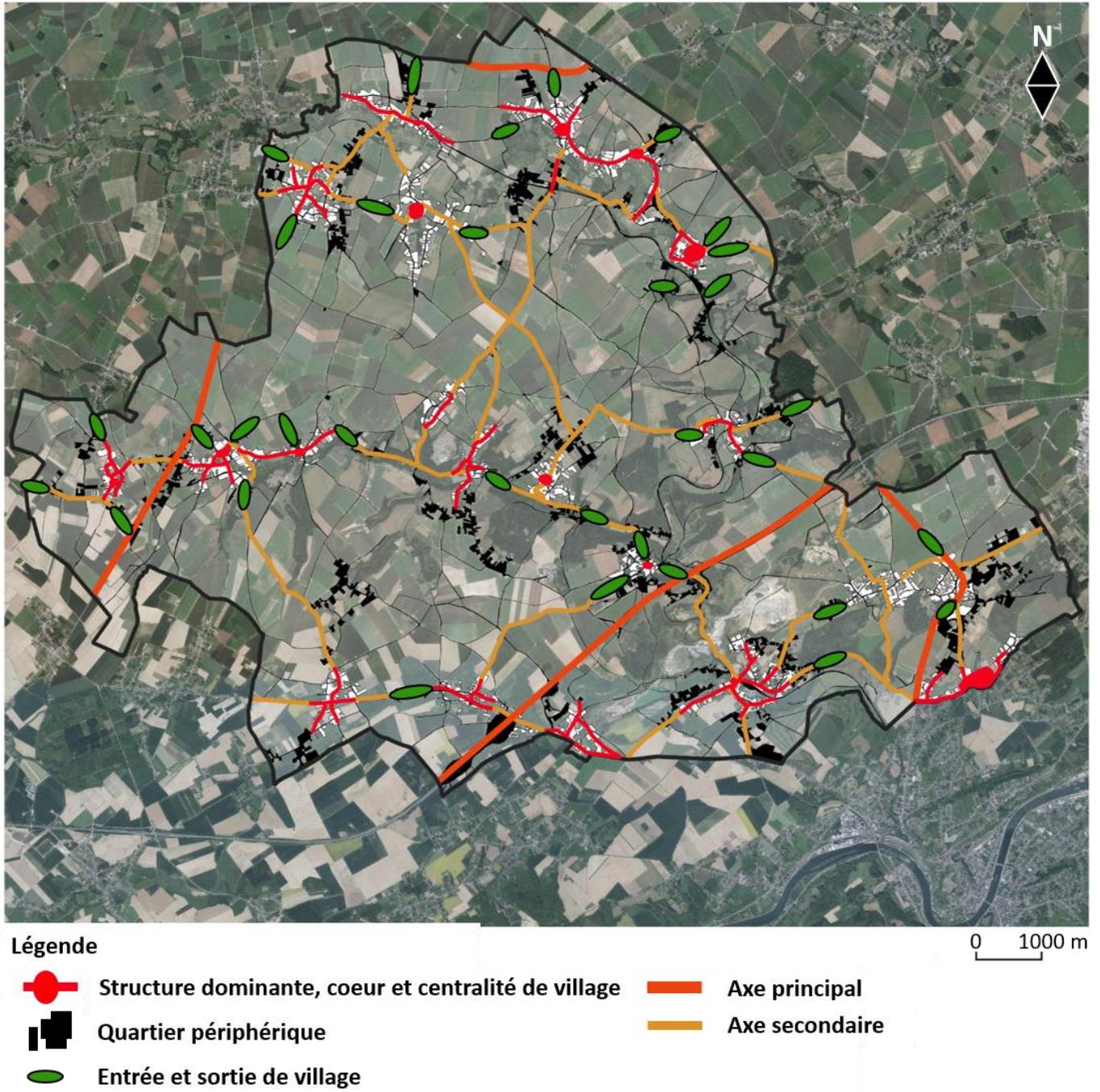


Figure 37 : Modélisation de la typologie d'espaces établie sur le Parc naturel. Source : Charlotte Angerand

A partir de cette carte, les points de conflit précédemment identifiés sont classés selon leur appartenance ou non à l'un des espaces présentés sur la carte.

Le Tableau 13 recense les luminaires en conflit avec la Trame Biodiversité selon les espaces de la typologie définie sur le Parc pour le début de nuit.

Tableau 13: Synthèse des points de conflit éclairage-biodiversité pour le scénario 2030 compris dans la typologie d'espaces définie. Source : Charlotte Angerand

Nombre de luminaires en conflit avec la Trame Habitats selon les typologies d'espace du Parc

Catégorie(s)	Début de nuit					Nombre total
	Structures dominantes	Quartiers périphériques	Entrées/sorties de village	Axes principaux	Axes secondaires	
1 ; 2 ; 3	3	0	8	0	6	17
1 ; 2	1	11	0	0	3	15
1 ; 3	76	109	42	8	74	309
1	19	30	13	2	25	89
2 ; 3	29	51	10	4	13	107
2	9	26	9	28	11	83
3	836	588	76	33	201	1734
Nombre total	973	815	158	75	333	2354

Nous remarquons qu'un total de 2354 luminaires est compris dans cette typologie. Cela représente 95,6% de la totalité des points de conflit précédemment identifiés sur le Parc, répartis de la façon suivante :

- Les structures dominantes des villages englobent 39,5% des points de conflit
- Les quartiers périphériques : 33,1%
- Les entrées et sorties de village : 6,4%
- Les axes principaux : 3,1%
- Les axes secondaires : 13,5%

Nous remarquons que pour les catégories de la Trame Habitats 1, 2 et 1;2, la totalité des points de conflit est comprise dans notre typologie d'espaces utilisée.

Pour les catégories restantes, les pourcentages de points de conflit pris en compte dans la typologie sont les suivants :

- Catégorie 2;3 : 99%
- Catégorie 3 : 96,9%
- Catégorie 1;3 : 93,6%
- Catégorie 1;2;3 : 34,7%

Parmi les points de conflit en cœur de nuit de la trame lumineuse principale, seuls 26 luminaires des catégories 1;2;3 ne sont pas repris dans la typologie d'espaces. Cela signifie que 98,9% des luminaires conflictuels sont pris en compte. La répartition selon la typologie est similaire au début de nuit présentée sur le Tableau 13.

La totalité des éclairages type autoroute est prise en compte dans la typologie établie (Tableau 14) ; C'est également le cas en cœur de nuit.

Tableau 14 : Synthèse des points de conflit éclairage "autoroute"-biodiversité pour le scénario 2030 compris dans la typologie d'espaces définie. Source : Charlotte Angerand

Catégorie(s)	Début et cœur de nuit			Nombre total
	Structures dominantes	Entrées/sorties de village	Axes principaux	
1 ; 2 ; 3	0	0	0	0
1 ; 2	0	0	0	0
1 ; 3	0	0	0	0
1	0	0	0	0
2 ; 3	3	0	0	3
2	1	1	4	6
3	2	1	2	5
Nombre total	6	2	6	14

Sur les 24 911,0 m² d'émissions lumineuses en conflit avec la biodiversité, un total de 15 468,8 m² est compris dans la typologie établie, soit environ 62% des émissions conflictuelles. Notons cependant qu'il ne s'agit que de conflits avec la catégorie 3 de la Trame Habitats. (Tableau 15)

Parmi ces conflits, nous observons que la typologie prend en compte 64,2% des émissions rouges conflictuelles, 59,7% des émissions vertes et 61,2% des émissions bleues.

Tableau 15 : Synthèse des émissions lumineuses en conflit avec la biodiversité comprises dans la typologie d'espaces établies. Source : Charlotte Angerand

	Canal	Structures dominantes	Quartiers périphériques	Entrées/sorties de village	Axes principaux	Axes secondaires	Surface totale (m ²)
Commerces	Rouge	26,1	0,0	0,0	1484,7	110,4	1621,3
	Vert	0,0	0,0	0,0	1362,8	102,8	1465,7
	Bleu	0,0	0,0	0,0	1092,1	48,1	1140,1
Gare, école et loisirs	Rouge	31,4	0,0	0,0	0,0	0,0	31,4
	Vert	22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	22,4
	Bleu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Eglise et cimetière	Rouge	71,7	0,0	0,0	0,0	0,0	71,7
	Vert	72,8	0,0	0,0	0,0	0,0	72,8
	Bleu	38,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38,0
Industrie et activité agricole	Rouge	0,0	0,0	0,0	0,0	53,1	53,1
	Vert	0,0	0,0	0,0	0,0	37,1	37,1
	Bleu	54,0	0,0	0,0	0,0	12,3	66,3
Particuliers	Rouge	2094,9	315,2	235,2	0,0	35,8	2681,0
	Vert	1305,9	319,4	198,4	0,0	38,8	1862,4
	Bleu	496,0	216,3	183,9	0,0	21,9	918,1
Voirie	Rouge	0,0	2721,6	312,8	65,5	0,0	3099,9
	Vert	0,0	1312,3	223,6	90,7	0,0	1626,7
	Bleu	0,0	453,5	144,5	63,0	0,0	660,9
Pénitencier	Tous canaux	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Surface totale (m²)		4213,1	5338,2	1298,3	4158,8	460,3	15468,8

Pour les commerces, les équipements collectifs, industries et activités agricoles ainsi que les voiries, l'intégralité des émissions conflictuelles avec la catégorie 3 sont prises en compte dans la typologie. Le pénitencier n'est quant à lui pas du tout concerné.

Les quartiers périphériques regroupent la plus grande surface d'émissions lumineuses en conflit avec la biodiversité (tous canaux confondus), avec 5338,2 m². Nous retrouvons ensuite les structures dominantes des villages (4213,1 m²) et les axes principaux (4158,8 m²).

Discussion

1. Discussion des résultats

1.1. Modélisation

Le travail mené se base sur la modélisation des données disponibles en termes de lumière artificielle nocturne et de biodiversité sur le Parc naturel Burdinale-Mehaigne.

La modélisation des Trames Lumières (actuelles et scénario 2030), montre une implantation de l'éclairage plus dense au niveau des villages du Parc, et éparse sur le réseau de voiries locales. Cette modélisation montre également une dominance des lampes Sodium Basse Pression sur le Parc, ainsi qu'une concentration des émissions lumineuses (identifiées par ortho-photographie nocturne) à proximité de la trame lumineuse principale.

La modélisation du scénario 2030 (éclairage LED) a une répartition spatiale similaire. Son emprise est cependant plus vaste, car la modélisation repose sur la linéarité de la relation puissance-flux lumineux des LEDs présenté dans l'étude bibliographique.

Ces modélisations se basent sur l'extrapolation de données issues de relevés de terrain ainsi que de principes théoriques. Ces résultats sont donc une simulation pouvant comprendre des différences avec la réalité.

La modélisation de la Trame Biodiversité montre une cohérence entre les Trames Habitats et Espèces. En effet, les relevés de gîtes de chiroptères, les points de contact et les liaisons écologiques témoignent d'un lien spatial avec les différents milieux qui composent la Trame Habitats.

Cela supporte le fait que la catégorie 3 de la Trame Habitats inclue les milieux nécessaires aux espèces de chauves-souris.

1.2. Fragmentation de la Trame Biodiversité

Le premier constat est que les Trame Lumière et Biodiversité sont spatialement similaires. En effet, la modélisation de la Trame Lumière montre un éclairage plus dense au niveau des zones d'habitation ; ces dernières se trouvent le long des vallées de la Burdinale et de la Mehaigne, au centre de la Trame Habitats.

Dans la situation actuelle, la recherche des impacts de l'ALAN sur la Trame Biodiversité montre que l'extinction de l'éclairage mis en place pour certains monuments et rues (Tableau 8, partie Matériels et Méthodes) permet de limiter l'isolement d'un gîte de chauve-souris identifié sur le Parc, mais ne diminue pas le nombre de fractures lumineuses sur la Trame Habitats (2 fractures identifiées).

Nous remarquons également qu'une de ces fractures segmente la liaison écologique définie au niveau régional. L'emplacement de cette fracture est inattendu et en contradiction avec le rôle d'une telle liaison, dont l'objectif est d'éviter toute fragmentation pouvant aboutir à une perte de biodiversité. (SPW, 2020)

La nature de ce conflit correspond à l'autoroute traversant de part en part le Parc naturel. Le projet de rénovation et de transition de l'éclairage de cette infrastructure autoroutière est engagé dans le

maintien de la biodiversité, et l'on peut supposer que leur(s) étude(s) d'impacts (Nugroho, 2013; SPW & SOFICO, 2019) défragmenteront la Trame Biodiversité.

Concernant la perte de surface au sein de la Trame Habitats, les résultats montrent que 3,2% de la surface totale est perdue. Ce pourcentage peu élevé présente un territoire nocturne assez peu impacté par l'ALAN.

La majorité des éclairages du Parc sont actuellement des lampes Sodium Basse Pression, des sources de lumière monochromatique (MEB - ANPCEN, 2015). La transition vers un éclairage public entièrement constitué de LEDs (blanches) n'augmente pas le nombre de luminaires, mais bien le nombre d'éclairages polychromatiques qui émettent dans les longueurs d'onde du bleu, reconnus plus néfastes pour la biodiversité (Anses, 2019; Lewanzik & Voigt, 2017; Schroer & Hölker, 2016; Verny & Busson, 2018).

Pour cette raison, l'augmentation des superficies d'habitats perdues dans le scénario 2030 est attendue. De plus, les pertes en début de nuit correspondent à l'augmentation de la dimension des halos déterminée sur base des relevés de terrain et de l'étude bibliographique.

Nous remarquons que la mise en place d'un dimming permet de réduire le nombre de fractures lumineuses de moitié entre le début et le cœur de nuit du scénario 2030. Ce nombre reste tout de même plus du double que dans la situation actuelle.

Les superficies d'habitats perdues sont également plus élevées dans le scénario 2030. Ce résultat est cohérent dû à l'augmentation du nombre d'éclairages polychromatiques, et notamment en début de nuit où la dimension du halo est augmentée, comme expliqué dans la partie Matériels et Méthodes.

La situation la plus critique vis-à-vis de la biodiversité est donc la situation de début de nuit du scénario 2030, avant le démarrage du dimming.

Nous pouvons cependant supposer que cette dernière n'a pas grand impact sur les chiroptères concernés dans notre étude. En effet, les espèces ici étudiées sont dans leurs gîtes estivaux, et leurs déplacements correspondent à ceux nécessaires à la chasse. Ces déplacements se réalisent du crépuscule à quelques heures après le crépuscule (Gaston et al., 2012; Lacoeylle et al., 2014; MEB - ANPCEN, 2015). Sur la Province de Liège, où se situe notre cas d'étude, la nuit tombe entre 19h41 et 21h58 lors de la saison estivale (Observatoire royal de Belgique, 2020). La sortie des gîtes des espèces étudiées durant l'été se fait donc après le démarrage du dimming mis en place par les communes (20h).

La situation en cœur de nuit du scénario 2030 est tout de même plus néfaste vis-à-vis de la biodiversité que la situation actuelle : même avec le dimming, les LEDs induisent plus de pertes de surfaces et de fractures lumineuses que l'éclairage actuel.

L'ensemble de ces constats apporte une première réponse à notre hypothèse : « H. 1 : La transition de l'éclairage traditionnel vers les LEDs va augmenter la fragmentation du paysage nocturne pour la biodiversité. »

Dans le cas étudié, la transition vers les LEDs augmente la fragmentation de la Trame Biodiversité. Gardons à l'esprit que cette trame se base en grande partie sur les chiroptères, et ne prend pas en compte l'ensemble de la biodiversité. Nous pouvons alors supposer qu'en tant qu'espèces parapluies, l'augmentation de la fragmentation du paysage nocturne pour les chauves-souris induit une tendance similaire pour le reste de la faune (même ordinaire).

Notons également que l'éclairage initialement présent sur le Parc (Sodium Basse Pression) influence fortement le résultat. En effet, le cas d'étude représente une transition d'un éclairage

monochromatique (SBP) vers un éclairage polychromatique (LED). Mais nous retrouvons également des éclairages dits « traditionnels » polychromatiques, comme les Sodium Haute Pression. La différence des impacts sur la biodiversité nocturne entre Sodium Haute Pression et LEDs est d'ailleurs mal connue (Anses, 2019; Lewanzik & Voigt, 2017).

L'hypothèse est donc validée pour notre cas d'étude.

La fragmentation et la perte d'habitats mis en avant ici pourrait aboutir à la disparition des espèces de chiroptères lucifuges. Ces dernières pourraient être amenées à migrer sur un nouveau territoire, à mourir par manque de nourriture ou par une sur-prédation liée à l'ALAN.

1.3. Identification et analyse des conflits biodiversité-éclairage

La recherche des conflits biodiversité-éclairage a abouti à l'identification d'environ 2500 luminaires dont le halo se superpose à la Trame Habitats ainsi que 2,5 hectares d'émissions lumineuses conflictuelles (canaux rouge, vert et bleu confondus).

Des conflits apparaissent dans toutes les catégories de la Trame Habitats, mais c'est la catégorie 3 qui est la plus touchée. Cela est un résultat attendu : elle se compose d'espaces non protégés et plus soumis à l'activité humaine (par exemple des vergers et des prairies). Ces occupations du sol se retrouvent à proximité des zones bâties, et donc des espaces éclairés.

Nous remarquons également de nombreux conflits au niveau de la catégorie 1 de la Trame Habitats où l'on retrouve des sites soumis à la Loi de Conservation de la Nature, sites Natura 2000. La transition vers les LEDs entre donc en conflit avec les objectifs de tels sites, visant à conserver et améliorer la quantité et la qualité des habitats pour la biodiversité (Gouvernement wallon, 2016).

Notons que plus de la moitié des luminaires de la trame lumineuse principale sont identifiés comme conflictuels pour la biodiversité. Cela pose la question de la pertinence des composants de la Trame Biodiversité, car un nombre élevé de conflits peut compliquer l'intervention finale souhaitée. Cela est d'autant plus délicat dans un contexte de transition de l'éclairage déjà enclenché. Cependant, la hiérarchisation des points de conflits établie contrebalance en permettant de visualiser les priorités.

Sur le territoire du Parc les émissions lumineuses représentent environ 36 hectares. Parmi elles, 7% sont en conflit avec la Trame Biodiversité. Bien que ce pourcentage soit bas, cela représente environ 25 000 m² d'émissions néfastes pour la biodiversité.

Ces conflits sont identifiés et localisés mais ne peuvent pas être traités de la même manière que la trame lumineuse principale, car les sources ne font pas partie du réseau public.

En effet, pour les commerces, les industries et activités agricoles, le pénitencier, ainsi que les particuliers, la gestion de l'éclairage relève du privé. Une diminution des émissions nécessite donc l'identification des gestionnaires et propriétaires ainsi qu'une sensibilisation adéquate à la pollution lumineuse. Le traitement de ces conflits avec la biodiversité n'est donc pas directement intégrable dans une intervention paysagère à l'échelle du Parc. Cela permet tout de même d'avoir un vue d'ensemble sur la pollution lumineuse, et de mettre en place des campagnes de sensibilisation ciblées, comme préconisé par les nombreuses mises en place de Trames Noires en France.

Pour les émissions identifiées comme appartenant aux voiries, la mise en valeur du patrimoine, des églises ainsi que les équipements collectifs, l'implication dans une intervention paysagère semble

réaliste. Les communes sont le plus souvent à l'origine de ces éclairages supplémentaires à la trame lumineuse principale.

1.4. Utilisation d'une typologie d'espaces

La typologie d'espaces utilisée dans ce travail englobe la majorité des points de conflits identifiés au sein de la trame lumineuse principale (95,6%). Elle répond donc, en grande partie, aux attentes établies dans la partie Matériels et Méthodes.

La catégorie la moins prise en compte est cependant la plus problématique vis-à-vis de la biodiversité, il s'agit des conflits avec les 3 catégories de la Trame Habitats simultanées (seulement 34,7% contre plus de 90% pour les autres catégories).

L'analyse cartographique montre que les sources lumineuses responsables de ces conflits se retrouvent principalement sur les routes locales de petites envergures, absente de la typologie établie dans ce travail. L'intégration de ce nouveau « type d'espace » pourrait permettre une plus grande prise en compte des conflits éclairages-biodiversité.

Notons également que la répartition des points de conflit dans la typologie d'espaces ne montre aucune tendance précise : chaque type d'espace se compose de plusieurs catégories de conflits.

La typologie utilisée ne comprend que 62% des émissions lumineuses en conflits avec la biodiversité, et uniquement celles correspondant à une superposition avec la catégorie 3 de la Trame Habitats. Ce résultat est cohérent, car la typologie concerne les espaces urbanisés (bâti et voiries), qui sont plus courant à proximité des composantes de la catégorie 3 (prairies, vergers...) que les espaces protégés tels que les forêts classées Natura 2000.

Bien que la majorité des émissions conflictuelles entre dans la typologie, les plus néfastes vis-à-vis de la biodiversité ne sont pas prises en compte. Cela signifie, dans un premier temps, que les sources d'émissions affectant les catégories 1 et 2 de la Trame Habitats sont excentrées des zones bâties.

L'utilisation de notre typologie apporte des résultats différents pour la trame lumineuse principale et les émissions lumineuses.

Le fait que toutes les émissions conflictuelles ne soit pas prises en compte ne semble pas perturber l'objectif de réalisation d'un support pour une intervention paysagère nocturne respectueuse de la biodiversité. Comme expliqué précédemment, la plupart de ces émissions requiert une intervention privée, et ne peuvent être incluses dans la démarche de création des paysages nocturnes.

De plus, nous pouvons imaginer que l'absence d'un trop grand nombre d'émissions dans la typologie utilisée permet de limiter les interférences de telles lumières dans une future intervention paysagère.

L'approche cartographique de la trame lumineuse principale pourrait quant à elle s'ajouter à une analyse paysagère afin de préciser les paysages nocturnes du territoire du Parc. Cela pourrait aboutir à la mise en place de lignes directrices pour définir différentes ambiances nocturnes pour chaque typologie d'espaces, tout en sachant quelles sources de lumières sont problématiques pour la biodiversité. L'utilisation de la typologie semble donc apporter un support possible pour la mise en place d'une Trame Noire alliant biodiversité et identité paysagère nocturne sur le Parc naturel Burdinale-Mehaigne.

2. Discussion du matériel et de la méthode

Pour ce travail, plusieurs sources d'information ont été utilisées. Chacune d'entre elles comporte des atouts et inconvénients que nous détaillerons ici.

2.1. Trame Lumière

Pour la modélisation de la **Trame Lumière**, trois types de données sont utilisées.

La trame lumineuse principale repose sur des relevés de terrain, qui ont servi à définir les halos lumineux autour des luminaires. Il s'agit du type de mesure couramment utilisé pour quantifier l'ALAN (Challéat, 2016).

Notons que dans la pratique, peu de relevés ont pu être réalisés sur le terrain. En effet, plusieurs contraintes ont été rencontrées :

- Différence entre la préparation cartographique et le terrain
 - o Implantation de luminaires non mentionnés dans le réseau public à proximité des éclairages sélectionnés
 - o Extinction des éclairages sélectionnés
 - o Présence d'obstacles empêchant les mesures (terrain clôturé, fossé...)

- Prise en main des outils de mesures compliquée
Le spectrophotomètre utilisé est un outil destiné aux professionnels. Une formation ou l'intervention d'un professionnel permettrait une utilisation optimale de l'appareil.

- Contexte des mesures
Les mesures sont réalisées la nuit tombée, sur la voirie. Certaines mesures n'ont pas été réalisées à cause de la configuration des routes (relief, végétation) qui ne permettait pas aux conducteurs d'anticiper notre présence.
Une fois encore, la présence de professionnels de l'éclairage permettrait un balisage et un cadre de réalisation des mesures en toute sécurité.

De manière générale, la modélisation de la Trame Lumière aurait mérité plus de mesures afin d'augmenter la précision des dimensions des halos. L'intervention de professionnels de l'éclairage serait un réel atout.

La méthode appliquée est couramment utilisée dans la quantification de l'ALAN et de la pollution lumineuse écologique, mais présente tout de même un inconvénient non négligeable souligné dans la littérature (Longcore & Rich, 2004) : nous mesurons ici l'éclairement. Rappelons qu'il s'agit d'une mesure en Lux et exprimant la luminosité perçue par l'œil humain (MEB - ANPCEN, 2015). L'ensemble des longueurs d'onde perçue par le vivant est donc plus vaste que celui pris en compte par nos mesures (Beier, 2006; BOYES et al., 2020; Verny & Busson, 2018).

Concernant les émissions lumineuses, la source de données utilisée est une ortho-photographie nocturne. Il s'agit donc d'un ensemble de clichés pris à un instant t , dans notre cas le 18 septembre 2020 aux alentours de 22h.

L'utilisation de telles données doit s'accompagner d'un regard critique : les émissions observables sont-elles représentatives des émissions réelles, quotidiennes ?

Nous avons choisi dans cette étude de considérer ces émissions comme exploitables pour plusieurs raisons :

- Résolution élevée
Les clichés obtenus ont une résolution de 1 pixel/m². Cela est un élément important pour l'utilisation souhaitée de l'ortho-photographie. En effet, une telle résolution permet de situer avec précision les sources de lumière, et donc de les analyser.
- Conditions météorologiques adéquates
Les clichés ont été réalisés par un ciel dégagé. Cela signifie que toute la surface du Parc a été photographiée de manière uniforme, ce qui assure une information cohérente sur l'ensemble du territoire d'étude. Une couverture nuageuse aurait induit de nombreuses erreurs d'interprétation, en laissant supposer des zones non éclairées.
- Informations estivales
Les clichés ont été réalisés à la fin de l'été. C'est sur cette même saison que repose l'étude des chiroptères dans notre travail. Pour cette raison, nous considérons que la faune étudiée peut être réellement confrontée à ces émissions.

Bien que l'ortho-photographie nocturne nous apporte des informations complémentaires à la trame lumineuse principale, il est important de garder à l'esprit les inconvénients de cette source de données :

- Déformation de l'image et artefacts
L'ortho-photographie est exploitée sur un logiciel SIG (ici Qgis), où les clichés doivent être géolocalisés. Cette manipulation induit une déformation de l'image source, pouvant entraîner une détérioration de l'information : déformation et artefacts.
La suppression manuelle des artefacts peut également engendrer des erreurs.
- Longueurs d'onde ciblées
Les données sont obtenues selon 3 canaux de couleurs correspondant aux longueurs d'onde du rouge, du vert et du bleu. Comme nous l'avons vu dans l'étude bibliographique, cela ne représente pas l'ensemble des émissions ayant un impact négatif sur le vivant.
- Vue du ciel
L'ortho-photographie nocturne est habituellement utilisée dans les études de la pollution lumineuse astronomique (Deverchère, 2018; Deverchère et al., 2018; Falchi et al., 2016). En effet, la lumière perçue depuis le ciel peut être différente de celle émise en direction du sol. C'est cette dernière qui concerne le plus la biodiversité.
- Disponibilité
Une ortho-photographie telle que celle utilisée est difficilement accessible, et peut avoir un coût d'accès relativement élevé.

L'ortho-photographie nocturne est une donnée utile pour avoir une vue d'ensemble et à grande échelle des sources lumineuses sur un territoire. Elle permet d'intégrer à la Trame Lumière des sources lumineuses hors du réseau public, et souvent non analysé dans la mise en place des Trames Noires. Sa représentativité de la réalité est cependant partielle, et il semble donc plus pertinent d'utiliser cette source d'information en tant que complément (de la trame lumineuse principale).

Afin d'augmenter la représentativité des données, différents éléments pourrait être approfondi :

- une multiplication des clichés (à différentes heures et saisons)
- une prise en compte plus vaste des longueurs d'onde
- des mesures sur le terrain, afin d'établir un lien entre les données de l'ortho-photographie et la réalité

La dernière source utilisée pour la Trame Lumière est l'ensemble des données locales. Ces informations mériteraient d'être plus complètes pour l'ensemble des 4 communes du Parc, car les données utilisées ne concernent que deux d'entre elles.

2.2. Trame Biodiversité

Les sources de données utilisées pour la réalisation de la **Trame Biodiversité** comportent également des atouts et inconvénients.

Concernant la Trame Espèces, nous avons ici utilisé le principe d'espèces parapluie (Roberge & Angelstam, 2004) avec les chiroptères. Ce choix est commun à de nombreuses études sur la faune nocturne et aux Trames Noires (Franchomme et al., 2019; Le Bras & Chevalier, 2019)

Nous pouvons par exemple citer les méthodologies des Trames Noires des Vosges Centrales (SCoT des Vosges Centrales, 2018), du parc national des Pyrénées (Sordello, Jupille, et al., 2018), le Parc naturel régional du Gâtinais en France (Azam et al., 2018) qui utilisent les chiroptères pour étudier la faune nocturne de manière générale.

Le choix des chiroptères est également appuyé par la littérature, qui identifie ces espèces comme les plus pertinentes à prendre en compte aux vues de leurs niches écologiques et de « l'abondance » des connaissances disponibles (Nugroho, 2013; Sordello, Azam, et al., 2018; Sordello & UMS PatriNat, 2019).

L'application de cette méthode a cependant montré un inconvénient :

- Etudes disponibles

Les études disponibles sur les chiroptères sur le territoire du Parc naturel Burdinale-Mehaigne sont peu nombreuses, et fortement ciblées : l'une concerne 1 seule espèce de chauve-souris (*Rhinolophus hipposideros*), l'autre concerne les gîtes d'été dans le bâti. Il n'y a donc pas d'étude « générale » sur la présence de chiroptères et leurs dynamiques sur le territoire.

Il serait intéressant de compléter ce travail avec une étude plus approfondie des chiroptères. Une analyse supplémentaire sur d'autres espèces nocturnes tels que les papillons de nuits ou rapaces nocturnes, ainsi que sur les dynamiques de déplacements des espèces permettrait une meilleure prise en compte de la biodiversité du Parc.

La réalisation de la Trame Habitats regroupe plusieurs données.

La prise en compte des habitats protégés se retrouve dans la grande majorité des études d'impacts de l'éclairage (Le Bras & Chevalier, 2019; Nugroho, 2013; Verhegghen, 2013).

L'ajout des habitats correspondant aux exigences écologiques pour la chasse des chiroptères permet une meilleure prise en compte de ces espèces parapluies, bien que peu d'informations soient disponibles sur le cas d'étude. Cela pose tout de même la question de la représentativité de la Trame Habitats : il n'y a aucune certitude que les « terrains de chasses » sélectionnés en sont vraiment. Comme pour la Trame Espèces, une étude approfondie des espèces considérées aiderait à affiner la sélection des éléments de la Trame Habitats.

2.3. Evaluation de la fragmentation de la Trame Biodiversité

L'estimation de la perméabilité du paysage nocturne se base sur les espèces de chiroptères lucifuges identifiées sur le cas d'étude ainsi que la liaison écologique d'échelle régionale du site. Ce choix est commun dans une telle étude de mise en place d'une Trame Noire.

Cependant, l'aspect infranchissable des éclairages polychromatiques utilisé dans notre étude est assez peu renseigné dans la littérature scientifique (présentée dans notre étude bibliographique).

Les obstacles infranchissables sont identifiés sur base de la simulation précédemment expliquée. Des erreurs lors de la modélisation des trames peuvent donc induire à nouveau des erreurs quant à l'identification des obstacles.

De plus, les halos de la trame lumineuse principale concernent un flux lumineux supérieur à 1 Lux. Cette valeur est choisie pour son équivalence à la lumière crépusculaire (MEB - ANPCEN, 2015). Cependant, les informations disponibles sur la répulsion des chiroptères à un tel flux ne sont pas assez précises pour affirmer la pertinence de ce choix.

L'évaluation réalisée donne donc un ordre d'idée de l'évolution possible de la fragmentation du paysage nocturne pour la faune, mais mériterait une étude plus approfondie pour affirmer ou non l'ensemble des conclusions.

2.4. Identification des points de conflit

L'identification des points de conflit entre biodiversité et éclairage se base sur la superposition cartographique ou non des halos lumineux sur la Trame Biodiversité.

Comme l'ensemble du travail, cette approche est théorique, et présente des inconvénients.

Une source d'erreur probable avec cette méthode est le manque de prise en compte du contexte géographique réel. Ainsi, comme l'illustre la Figure 38, une superposition des Trame Lumière et Biodiversité sur l'outil SIG peut ne pas être une représentation fidèle du terrain. Des obstacles (murs, haies, ...) ainsi que le relief peuvent influencer sur l'emprise d'un luminaire.

Enfin, la méthode appliquée pour déterminer les points de conflits ne différencie pas les luminaires selon l'ampleur de la superposition entre le halo et la Trame Biodiversité. Cela signifie qu'un luminaire dont 10% du halo est superposé à la Trame Biodiversité est considéré au même titre qu'un second luminaire dont 90% du halo est conflictuel.

Bien que cette logique réponde au principe de précaution pour la biodiversité, il est possible qu'elle augmente fortement le nombre d'éléments considérés comme conflictuels.

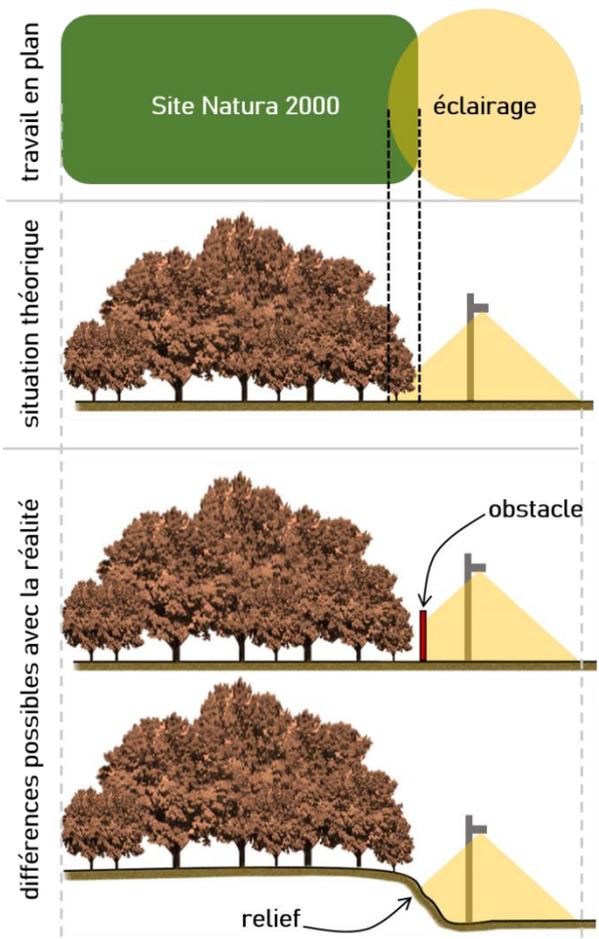


Figure 38 : Différences possibles entre le travail en plan et la réalité. Source : Charlotte Angerand

2.5. Utilisation d'une typologie d'espaces

La typologie utilisée se compose de différents éléments urbains identifiés comme structurants et centraux au niveau du Parc naturel, elle ne prend pas en compte le patrimoine naturel du site.

Le choix d'une telle typologie présente des atouts et inconvénients.

Tout d'abord, l'utilisation même d'une typologie d'espaces permet une future intervention sur l'éclairage divisant le territoire en différents secteurs d'action (comparable aux études de Trame Noire), tout en apportant une information précise concernant l'impact sur la biodiversité.

La typologie concerne le bâti et les voiries qui sont les éléments les plus éclairés dans une logique d'éclairage fonctionnel.

Les types d'espaces utilisés représentent la structure du Parc, mais ne prennent pas en compte des éléments paysagers forts tels que le relief et le patrimoine bâti. Il est donc probable que dans une

démarche de création d'ambiances nocturnes basée sur cette étude, une distinction plus précise des espaces selon leurs caractéristiques soit nécessaire.

Cette typologie est une première amorce vers la mise en place d'une Trame Noire prenant en compte l'identité nocturne d'un territoire au même titre que la biodiversité.

La démarche doit nécessairement être complétée par une analyse paysagère fine afin de définir les ambiances nocturnes adaptées à chaque espace, en prenant en compte les besoins de la biodiversité ainsi que des populations humaines.

Les nombreuses variables de l'éclairage telles que la direction, la couleur, l'intensité et la durée, sont autant d'outils pour la création d'une identité nocturne au sein du Parc naturel Burdinale-Mehaigne.

Notons enfin que l'étude n'aborde pas le volet social, qui apparaît dans la littérature comme un élément clé dans la mise en place d'une Trame Noire. Cet aspect comprend la communication et la sensibilisation des populations concernées aux enjeux autour de l'obscurité.

Un telle démarche serait favorable sur le Parc afin d'accompagner la mise en place de la Trame Noire pour deux raisons :

- Eviter un rejet des interventions par les habitants
- Engendrer une prise de conscience sur la pollution lumineuse qui pourrait aboutir à la diminution des émissions lumineuses provenant du domaine privé

Conclusion et perspectives

La pollution lumineuse est une notion récente, dont les enjeux à l'échelle mondiale sont incontestables. Un manque de recul apparaît cependant concernant les impacts réels de la lumière artificielle sur la biodiversité et sur le long terme.

Afin d'adapter notre éclairage aux besoins en obscurité du monde vivant, de nombreuses démarches sont mises en place sur nos territoires. La Trame Noire permet notamment de repenser notre rapport à la nuit.

La mise en pratique d'une telle démarche montre cependant une absence quasi-totale de la notion de paysages nocturnes dans les contextes ruraux, et abouti bien souvent à des interventions uniformes et homogènes de grande ampleur.

Le travail réalisé sur le Parc naturel Burdinale-Mehaigne présente une nouvelle approche ayant pour objectif de créer un support pour la mise en place d'une Trame Noire respectant les besoins de la biodiversité et permettant une future intervention paysagère nocturne.

Les résultats de cette recherche montrent la multiplicité des variables à prendre en compte dans la réalisation d'une Trame Noire. Les connaissances sur la lumière ainsi que sur son lien avec le monde du vivant témoignent de l'importance des différents acteurs du territoire dans la lutte contre la pollution lumineuse.

Tout d'abord, la multitude de facteurs à prendre en compte et la complexité des données à l'échelle du cas d'étude laisse penser que la mise en place d'une Trame Noire ne peut se réaliser sans des études approfondies réalisées par, ou avec, des professionnels de l'éclairage et des écologues.

Ensuite, la mise en place de la trame ne peut se faire sans une sensibilisation bienveillante auprès des populations du Parc.

Une identification précise, à l'échelle du luminaire, des conflits biodiversité-éclairage est néanmoins possible. Leur cartographie, ainsi que les divers guides de pratiques sur l'éclairage, laissent entrevoir l'opportunité de traiter les conflits dans une intervention paysagère nocturne à l'échelle du Parc naturel.

Ce travail est donc une amorce, pour la biodiversité et les habitants du Parc, vers de nouveaux paysages nocturnes.

Bibliographie

- Académie française. (1986). *Définition de "Nuit"* (9th ed.). <https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9N0803>
- ANPCEN. (2000). *Charte pour la protection du ciel et de l'environnement nocturne*. https://www.anpcen.fr/docs/20150212194601_ggalta_doc128.pdf
- Anses. (2019). *Effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des diodes électroluminescentes (LED)*. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2014SA0253Ra.pdf>
- ASCEN. (2019). *La pollution lumineuse, une pollution à part entière*.
- ASCEN, & OCA. (2019). *Charte Province de Luxembourg, espace étoilé*.
- Aubé, M., & Kimenau, C. (2020). *Martin Aubé à propos de la Pollution Lumineuse*. https://www.youtube.com/watch?v=QATsQBK1Z8M&feature=emb_logo
- Aujollet, Y., & David, D. (2014). *Législations et réglementations étrangères en matière de lutte contre les nuisances lumineuses*. <https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/144000677.pdf>
- Auricoste, I., Landel, J.-F., & Simoné, M. (2018). *À La Reconquête De La Nuit*. https://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/Affaires-0010973/012301-01_rapport-publie.pdf
- Azam, C., Le Viol, I., Bas, Y., Marmet, J., Julien, J.-F., Pauwels, J., & Kerbirou, C. (2018). *Effectivité de la Trame verte et bleue au regard de la Trame noire: comment limiter l'impact de l'éclairage artificiel nocturne sur les Chauves-souris ?* *Symbioses*, 37(April), pp.75–77. https://www.researchgate.net/publication/324390941_Effectivite_de_la_Trame_verte_et_bleue_au_regard_de_la_Trame_noire_comment_limiter_l'impact_de_l'eclairage_artificiel_nocturne_sur_les_Chauves-souris
- Beier, P. (2006). *Effects of artificial lighting on terrestrial mammals*. In C. Rich & T. Longcore (Eds.), *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. pp. 19–42.
- Bovet-Pavy, A. (2018). *Lumières sur la ville*. pp.212-218.
- BOYES, D. H., EVANS, D. M., FOX, R., PARSONS, M. S., & POCOCK, M. J. O. (2020). *Is light pollution driving moth population declines? A review of causal mechanisms across the life cycle*. *Insect Conservation and Diversity*. <https://doi.org/10.1111/icad.12447>
- Briggs, W. R. (2002). *Plant photoreceptors: proteins that perceive information vital for plant development from the light environment*. *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, 7. <https://www.urbanwildlands.org/Resources/ECANLProgram.pdf>
- Challéat, S. (2009). *La pollution lumineuse : passer de la définition d'un problème à sa prise en compte technique*. In *Eclairer la ville autrement - Innovations et expérimentations en éclairage public* pp. 182–197. Presses Polytechniques Universitaires Romandes. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00924383/file/CHALLEAT_La_pollution_lumineuse_-_passer_de_la_definition_d_un_probleme_a_sa_prise_en_compte_-_in_Eclairer_la_ville_autrement_v3.pdf
- Challéat, S. (2016). *Notions simplifiées d'éclairagisme*. Blog Du Collectif RENOIR – Ressources Environnementales Nocturnes & TerritOIRes [Carnet de Recherche]. <https://renoir.hypotheses.org/1364>
- Challéat, S. (2018). *Le socioécosystème environnement nocturne : un objet de recherche interdisciplinaire*. *EDP Sciences*, 26(3), pp.257–269. <https://doi.org/10.1051/nss/2018042i>

- Challéat, S. (2019). *Sauver la nuit Comment l'obscurité disparaît, ce que sa disparition fait au vivant, et comment la reconquérir* (Premier Parallèle (ed.); 1st ed.).
- Challéat, S., & Lapostolle, D. (2014). *(Ré)concilier éclairage urbain et environnement nocturne: Les enjeux d'une controverse sociotechnique*. *Natures Sciences Societes*, 22(4), pp.317–328.
<https://doi.org/10.1051/nss/2014045>
- Cinzano, P., Falchi, F., & Elvidge, C. D. (2000). *Le premier atlas mondial de la clarté artificielle du ciel nocturne*.
<http://www.lightpollution.it/dmsp/>.
- Cohen, T., De Kerangal, M., & Luminet, J.-P. (2012). *Villes éteintes* (Marval (ed.)).
- Commission européenne. (2019). *REGLEMENT (UE) 2019/2020 DE LA COMMISSION*. Journal officiel de l'Union européenne pp. 209–240.
- Cotte, M., & ICOMOS. (2017). *Heritage sites of astronomy and archaeoastronomy in the context of the UNESCO World Heritage Convention*. C. Ruggles (Ed.), *Heritage sites of astronomy and archaeoastronomy in the context of the UNESCO World Heritage Convention*. Vol. 2, pp. 7–16. International Council on Monuments and Sites, Ocarina Books Ltd.
https://www3.astronomicalheritage.net/_downloads/ocarinabooks.com/heritage-of-astronomy_thematic-study_2ndedition.pdf
- De Lumley, H. (2017). *Domestication du feu aux temps paléolithiques* (Odile Jacob).
https://www.odilejacob.fr/catalogue/sciences-humaines/archeologie-paleontologie-prehistoire/domestication-du-feu-aux-temps-paleolithiques_9782738135001.php
- Deverchère, P. (2018). *Métrologie de la pollution lumineuse*. pp.4-23
- Deverchère, P., Vauclair, S., & Bonavitacola, M. (2018). *Mesure et modélisation de la pollution lumineuse*. pp. 1–4. <https://darks skylab.com/publications/Mesure et modélisation - DarkSkyLab - mars 2018.pdf>
- Eisenbeis, G., & Hänel, A. (2009). Chapter 15. *Light pollution and the impact of artificial night lighting on insects*. Cambridge University Press.
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C. M., Elvidge, C. D., Baugh, K., Portnov, B. A., Rybnikova, N. A., & Furgoni, R. (2016). *Un nouvel atlas mondial de la luminosité artificielle du ciel nocturne*. *Science Advances*, 10(6), 1600377. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377>
- Fédération Parcs naturels de Wallonie. (2019). *Rapport d'activité 2019*. pp. 1-24.
https://www.parcsnaturelsdewallonie.be/wp-content/uploads/2020/09/rapport-d-activites-2019_hd.pdf
- Ffrench-Constant, R. H., Somers-Yeates, R., Bennie, J., Economou, T., Hodgson, D., Spalding, A., & McGregor, P. K. (2016). *Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom*. *Proceedings B of the Royal Society : Biological Sciences*, 283 : 20160813. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.0813>
- Franchomme, M., Hinnewinkel, C., & Challéat, S. (2019). *The trame noire, an indicator of the place of nature in land use planning. Practices and motivations of the municipalities of the lille european metropolis*. *Bulletin d'Association de Geographes Francais*, 96(2), pp.161–180. <https://doi.org/10.4000/bagf.4764>
- Gallaway, T. (2015). *The Value of the Night Sky*. In J. Meier, U. Hasenöhrl, K. Krause, & M. Pottharst (Eds.), *Urban lighting, light pollution and society*. pp. 267–283. Routeledge.
- Gaston, K. J., Bennie, J., Davies, T. W., & Hopkins, J. (2013). *The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal*. *Biological Reviews*. Vol. 88, Issue 4, pp. 912–927.
<https://doi.org/10.1111/brv.12036>

- Gaston, K. J., Davies, T. W., Bennie, J., & Hopkins, J. (2012). *Reducing the ecological consequences of night-time light pollution: options and developments*. *Journal of Applied Ecology*, 49, pp. 1256–1266. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02212.x>
- Gemenne, F., Rankovic, A., Atelier de cartographie de Sciences Po, Zalasiewicz, J., & Latour, B. (2019). *Atlas de l'anthropocène*.
- Geocarto International Centre Ltd. (n.d.). Retrieved October 18, 2020. <http://m.geocarto.com.hk/s-imaginfo.php?satId=JILIN-01>
- Gouvernement wallon. (2016). *Arrêté du Gouvernement wallon fixant les objectifs de conservation pour le réseau Natura 2000 (M.B. 22.12.2016)*. Législation/Natura 2000 Objectifs de Conservation. <http://environnement.wallonie.be/legis/consnat/natura170.html>
- Gwiazdzinski, L. (2005). *Extension du domaine du jour. La nuit, nouveau champ de conflits et d'invention urbaine*. Colloque de Cerisy : La nuit en question(s). pp. 183–201.
- Gwiazdzinski, L. (2016a). *Une insécurité relative*. Rhuthmos (Ed.), *La nuit, dernière frontière de la ville* pp. 156–164.
- Gwiazdzinski, L. (2016b). *Une notion floue et ambiguë*. In Rhuthmos (Ed.), *La nuit, dernière frontière de la ville* pp. 23–58.
- Hendrickx, S. (2017). *Protection et conservation du patrimoine naturel wallon*. CPDT (Vol. 69). <http://www.lepur.ulg.ac.be>
- Hölker, F., Wolter, C., Perkin, E. K., & Tockner, K. (2010). *Light pollution as a biodiversity threat*. *Trends in Ecology and Evolution*, 25(12), pp.681–682. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.09.007>
- International Dark Sky Association. (2014). *International Dark Sky Places*. <https://www.darksky.org/our-work/conservation/idsp/>
- Keniger, L. E., Gaston, K. J., Irvine, K. N., & Fuller, R. A. (2013). *What are the benefits of interacting with nature?* *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10(3), pp.913–935. <https://doi.org/10.3390/ijerph10030913>
- Kimenu, C. (2020). *Où sont passées les lucioles ?* <https://www.youtube.com/watch?v=jBFRKJnE6BI>
- Knop, E., Zoller, L., Ryser, R., Gerpe, C., Hörlner, M., & Fontaine, C. (2017). *Artificial light at night as a new threat to pollination*. *Nature*, 548(7666), pp.206–209. <https://doi.org/10.1038/nature23288>
- Lacoeuilhe, A., Machon, N., Julien, J.-F., Le Bocq, A., & Kerbiriou, C. (2014). *The Influence of Low Intensities of Light Pollution on Bat Communities in a Semi-Natural Context*. *PLoS ONE*, 9(10), 8. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103042>
- Laforge, A., Pauwels, J., Faure, B., Bas, Y., Kerbiriou, C., Fonderflick, J., & Besnard, A. (2019). *Reducing light pollution improves connectivity for bats in urban landscapes*. *Landscape Ecology*, 0. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00803-0>
- Las Vergnas, O. (2007). *Conférence sur le ciel, miroir des cultures*. Le Ciel, Miroir Des Cultures. Association Française d'astronomie.
- Lazou, J.-M., & Kimenu, C. (2020). *Jean-Michel Lazou à propos de la Pollution lumineuse*. <https://www.youtube.com/watch?v=SDeBRr5mBZg&feature=youtu.be>
- Le Bras, V., & Chevalier, P. (2019). *Actions « pollution lumineuse et biodiversité » sur le territoire de la Métropole Nice Côte d'Azur*.

- Le Robert. (n.d.-a). *éclairage - Définitions, synonymes, exemples*.
<https://dictionnaire.lerobert.com/definition/eclairage>
- Le Robert. (n.d.-b). *Nuit - Définitions, synonymes, exemples*. <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/nuit>
- Lévy, R. (2005). *Penser la nuit*. Colloque de Cerisy : La nuit en question(s). éditions d. pp. 23–30. Centre culturel international de Cerisy-la-Salle.
- Lewanzik, D., & Voigt, C. C. (2017). *Transition from conventional to light-emitting diode street lighting changes activity of urban bats*. *Journal of Applied Ecology*, 54(1). pp.264–271. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12758>
- LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (1), (2009). <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000020949548/2020-11-08/>
- Longcore, T. (2018). *Hazard or Hope ? LEDs and Wildlife*. *Research: Light Spectrum & Wildlife*, 70, pp.52–57.
- Longcore, T., & Rich, C. (2004). *Ecological light pollution*. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(4), pp.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)
- Macgregor, C. J., Evans, D. M., Fox, R., & Pocock, M. J. O. (2017). *The dark side of street lighting: impacts on moths and evidence for the disruption of nocturnal pollen transport*. *Global Change Biology*, 23(2), pp.697–707. <https://doi.org/10.1111/gcb.13371>
- Marín, C. (2009). *Réserve Starlight*. <https://issuu.com/pubcipriano/docs/reservestarlightr>
- Marín, C., & Jafari, J. (2007). *Déclaration pour la défense du ciel nocturne et le droit à la lumière des étoiles (déclaration de La Palma)*. Conférence Internationale Pour La Défense de La Qualité Du Ciel Nocturne et Le Droit d'observer Les Étoiles. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- MEB - ANPCEN. (2015). *Eclairage et biodiversité*. *Les Cahiers de Biodiv'* 2050, 6.
- Meitinger, S. (2011). *Hymnes à la nuit de Novalis*. *OeO Oeuvres ouvertes* (p. 28).
- MEL. (2019). *La Trame noire en contexte urbain*. Synthèse de l'étude « TRAMENOIRE » menée en 2015- 2017 en métropole lilloise et perspectives. pp.1–12.
- Meynier, A. (2008). *La protection du ciel nocturne : Le droit de l'environnement et la pollution lumineuse*. http://www.astrosurf.com/licorness/autres-travaux/Memoire_d'Adeline_Meynier.pdf
- Millet, B. (2005). *L'homme, animal diurne ?* In *La nuit en question(s)*. pp. 65–73.
- Ministère de la Transition Ecologique. (2019). *Pollution lumineuse*. <https://www.ecologie.gouv.fr/pollution-lumineuse>
- Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2019). *Nuisances lumineuses, de nouvelles obligations*. [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plaquette arrêté nuisancesLumineuses.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plaquette%20arr%C3%AAt%C3%A9%20nuisances%20lumineuses.pdf)
- Natagora. (n.d.). *Législation: Groupe de travail Chauve-souris*. <https://plecotus.natagora.be/index.php?id=699>
- Natagora. (2020a). *La trame noire comme outil de protection de la nature urbaine ?* <https://volontariat.natagora.be/index.php?id=4725>
- Natagora. (2020b). *Projet Smart Light-Hub*. *Art, Nature et Innovation*. <https://www.natagora.be/art-nature-innovation>
- Nugroho, M. B. (2013). *Evaluation appropriée des incidences (EAI) sur Sites Natura 2000 et analyse des impacts environnementaux sur la biodiversité concernés par le projet de rénovation de l'éclairage public autoroutier et des routes régionales en Wallonie (Plan Lumière 4.0)*. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), pp.1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Observatoire royal de Belgique. (2020). *Ephéméride annuel, Liège*. <https://www.astro.oma.be/fr/>
- Parc naturel Burdinale-Mehaigne. (n.d.). *Présentation du Parc naturel Burdinale-Mehaigne*. Le Parc Naturel Burdinale-Mehaigne, Un Territoire Naturellement Humain. <http://pnbm.be/index.php/presentation/>
- Pawson, S. M., & Bader, M. K.-F. (2014). *LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature*. *Ecological Applications*, 24(7), pp.1561–1568. <https://doi.org/10.1890/07-1650.1>
- Petit, A. (2016). *Inventaires de chiroptères sur le territoire du Parc Naturel Burdinale-Mehaigne et appui au suivi des oiseaux de plaine*.
- Plecotus. (n.d.). *Groupe de travail Chauve-souris de Natagora*. <https://plecotus.natagora.be/index.php?id=700>
- Ranzoni, J. (2018). *Pollution lumineuse et trame noire : Proposition d'une méthode de cartographie à l'échelle du bassin genevois*.
- Reculin, S. (2017). « *Le règne de la nuit désormais va finir* » *L'invention et la diffusion de l'éclairage public dans le royaume de France*. pp.1697-1789. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01915183/document>
- Roberge, J. M., & Angelstam, P. (2004). *Usefulness of the Umbrella Species Concept as a Conservation Tool*. *Conservation Biology*, 18(1), pp.76–85. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00450.x>
- Rowse, E. G., Harris, S., & Jones, G. (2016). *The Switch from Low-Pressure Sodium to Light Emitting Diodes Does Not Affect Bat Activity at Street Lights*. pp.1-14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150884>
- Russo, D., Ancillotto, L., Cistrone, L., Libralato, N., Domer, A., Cohen, S., & Korine, C. (2019). *Effects of artificial illumination on drinking bats: a field test in forest and desert habitats*. *Animal Conservation*, 22(2), pp.124–133. <https://doi.org/10.1111/acv.12443>
- Schroer, S., & Hölker, F. (2016). *Impact of lighting on Flora and Fauna*. In *Handbook of Advanced Lighting Technology*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-00295-8>
- SCoT des Vosges Centrales. (2018). *Mettre en Lumière l'Univers de la Nuit. Guide pour une sobriété de l'éclairage public dans les Vosges Centrales*. Vol. I pp. 1-64.
- Siblet, J.-P. (2008). *Impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité. Synthèse bibliographique*. Rapport MNHN-SPN (Issue Rapport MNHN-SPN / MEEDDAT n°8).
- Siblet, J. (2017). *IMPACTS DE LA POLLUTION LUMINEUSE*.
- Sierro, A. (2019). *La lumière nuit ! La nature face à la pollution lumineuse*.
- Sordello, R. (2017a). *Les conséquences de la lumière artificielle nocturne sur les déplacements de la faune et la fragmentation des habitats : une revue*. *Bulletin de La Société Des Naturalistes Luxembourgeois*, 119, pp.39–54. https://www.snl.lu/publications/bulletin/SNL_2017_119_039_054.pdf
- Sordello, R. (2017b). *Pollution lumineuse et trame verte et bleue : vers une trame noire en France ? Territoire En Mouvement*, 35, pp.26. <http://tem.revues.org/4381>
- Sordello, R. (2017c). *Pistes méthodologiques pour prendre en compte la pollution lumineuse dans les réseaux écologiques*. <http://Journals.Openedition.Org/Vertigo>, 17(3). <https://doi.org/10.4000/VERTIGO.18730>
- Sordello, R., Azam, C., Amsallem, J., Bas, Y., Billon, L., & Busson, S. (2018). *Construire des indicateurs nationaux sur la pollution lumineuse Réflexion préliminaire*.
- Sordello, R., Jupille, O., Vauclair, S., Salmon-Legagneur, L., Deutsch, E., & Faure, B. (2018). *Trame noire : un sujet qui "monte" dans les territoires*. *Sciences Eaux & Territoires, La Revue d'Irstea*, 45, pp.1–9. http://www.set-revue.fr/sites/default/files/articles/pdf/set-revue-trame-noire-pollution_lumineuse-territoires_0.pdf

- Sordello, R., & UMS PatriNat. (2019). *De la Trame verte et bleue à la Trame noire : enjeux, concepts et état des lieux*.
- Sordello, R., Vanpeene, S., Azam, C., Kerbirou, C., Le Viol, I., & Le Tallec, T. (2014). *Effet fragmentant de la lumière artificielle. Quels impacts sur la mobilité des espèces et comment peuvent-ils être pris en compte dans les réseaux écologiques ?*
- SPW. (n.d.). *Liste des statuts de protection pour les sites, législation*. La Biodiversité En Wallonie. <http://biodiversite.wallonie.be/fr/sites.html?IDC=2914>
- SPW. (2020). *Liaisons écologiques – Article D.II.2, §2, alinéa 4 du Code du Développement territorial*. <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/07574b4f-65ec-4d70-90e1-533d4404d2f8.html>
- SPW, & SOFICO. (2019). *Projet LuWa*. <https://www.luwa.be/>
- Stone, E. L., Jones, G., & Harris, S. (2012). *Conserving energy at a cost to biodiversity? Impacts of LED lighting on bats*. *Global Change Biology*, 18(8), pp.2458–2465. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02705.x>
- Swaddle, J. P., Francis, C. D., Barber, J. R., Cooper, C. B., Kyba, C. C. M., Dominoni, D. M., Shannon, G., Aschehoug, E., Goodwin, S. E., Kawahara, A. Y., Luther, D., Spoelstra, K., Voss, M., & Longcore, T. (2015). *A framework to assess evolutionary responses to anthropogenic light and sound*. *Trends in Ecology and Evolution* (Vol. 30, Issue 9, pp. 550–560). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.06.009>
- UNESCO. (2020). *Astronomy and World Heritage Thematic Initiative. Statement Concerning Dark Skies and Celestial Objects*. <https://whc.unesco.org/en/astronomy/>
- Urbanski, J., Mogi, M., O'Donnell, D., DeCotiis, M., Toma, T., & Armbruster, P. (2012). *Rapid adaptive evolution of photoperiodic response during invasion and range expansion across a climatic gradient*. *American Naturalist*, 179(4), pp.490–500. <https://doi.org/10.1086/664709>
- Vauclair, S., & Kimenau, C. (2020). *Sébastien Vauclair à propos de la Pollution lumineuse*. https://www.youtube.com/watch?v=PXlnAe1-yrQ&feature=emb_logo
- Venter, F. (2019). *La pollution lumineuse : impacts, solutions et réglementation*. Projet Interreg TVBuONAIR.
- Verhegghen, E. (2013). *Pollution lumineuse*. *L'Homme & l'Oiseau*, 2, pp.28–39.
- Verny, P., & Busson, S. (2018). *Étude AUBE* (pp. 1–148). https://www.cerema.fr/system/files/documents/2018/01/Etude_Aube_V2018.pdf
- Vivre à Bruxelles. (2020). *“Bright Brussels” - Festival des lumières de Bruxelles 2020*. <https://vivreabruelles.be/bright-brussels-festival-des-lumieres-de-bruxelles-2019.html>
- Voigt, C. C., Gazaryan, S., & Meyer-cords, T. (2018). *EUROBATS*. Guidelines for consideration of bats in lighting projects (Issue 8).

Table des figures

Figure 1 : Evolution de la lumière artificielle nocturne sur le territoire européen entre 1992 et 2010, clichés nocturnes satellitaires. Source : ASCEN, 2019	1
Figure 2 : la nuit étoilée de Van Gogh, 1889. Source : Museum of Modern Art.....	4
Figure 3 : PARIS 48° 52' 16" N 2012-06-17 LST 17:30. Source : Cohen et al., 2012	5
Figure 4 : signatures spectrales de différentes sources lumineuses. Source : BOYES et al., 2020	10
Figure 5 : échelle de température de la lumière. Source : Charlotte Angerand, basé sur ASCEN, 2019; MEB - ANPCEN, 2015; Verny & Busson, 2018	10
Figure 6 : modélisation de l'éclairage au sol de luminaires pour éclairage résidentiel. En Lux (lx) : modélisation réalisée sous le logiciel DIALux*, pour deux types de luminaires pour éclairage résidentiel, aux photométries différentes. Source : Challéat, 2016	12
Figure 7 : Schéma explicatif de la pollution lumineuse, ses phénomènes et nuisances ainsi que ses impacts principaux. Source : Charlotte Angerand, basé sur Challéat, 2009; Longcore & Rich, 2004; J.-P. Siblet, 2008; J. Siblet, 2017	15
Figure 8 : Grandes catégories de phénomènes et nuisances de la pollution lumineuse. a : Skyglow au-dessus de la ville de Strasbourg. Source : Kimenau, 2020 ; b : Illumination de Notre-Dame des Sablons à Bruxelles, Bright Brussels 2020. Source : Vivre à Bruxelles, 2020 ; c : éblouissement par des éclairages artificiels. Source : J. Siblet, 2017.....	16
Figure 9 : schéma explicatif de la pollution lumineuse écologique. Source : Charlotte Angerand, basé sur Challéat, 2009; Longcore & Rich, 2004; J.-P. Siblet, 2008; J. Siblet, 2017	19
Figure 10 : réponses des chiroptères face à la lumière pour différentes situations. Source : Charlotte Angerand, traduit de Voigt et al., 2018	21
Figure 11 : Comparaison des spectres énergétiques de différentes sources LEDs (LEDs blanches et ambrée). Source : Charlotte Angerand, basé www.LED-FR.net et Innolumis cités par Verny & Busson, 2018	24
Figure 12 : Evolution du flux lumineux en cas de réduction de l'alimentation énergétique. Comparaison d'un éclairage traditionnel (SHP) et d'une LED. Source : Verny & Busson, 2018	25
Figure 13 : Extrait des nouvelles obligations de l'arrêté de 2018 sur les nuisances lumineuses du Ministère de la Transition écologique et solidaire. Source : Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2019	30
Figure 14 : Extrait des recommandations pour l'éclairage public du fascicule "La lumière nuit!". Source : Sierro, 2019.....	31
Figure 15 : Schéma explicatif de la Trame Noire. Source : Sordello, 2017b	32
Figure 16 : Méthodes de définition d'une Trame Noire. Source : Sordello & UMS PatriNat, 2019.....	33
Figure 17 : Carte de synthèse des conflits entre éclairage et biodiversité sur le territoire des Vosges Centrales. Source : Trame Noire des Vosges Centrales.....	35
Figure 18 : Schéma explicatif de la méthodologie de l'étude. Source : Charlotte Angerand	42
Figure 19 : Parc naturel Burdinale-Mehaigne. Source : Charlotte Angerand, basé sur ortho-photographie	43
Figure 20 : Schéma explicatif de la sélection d'un éclairage pour la mesure de son flux lumineux. Source : Charlotte Angerand.....	46
Figure 21 : Schéma du protocole de mesure du flux lumineux d'un éclairage. Source : Charlotte Angerand	46
Figure 22 : Extrait d'ortho-photographie nocturne (Parc naturel Burdinale-Mehaigne). Source : Charlotte Angerand, basé sur Geocarto International Centre Ltd.....	47

Figure 23 : Différentiation entre source lumineuse distincte et surface lumineuse sur ortho-photographie nocturne. a) groupements de pixels en cercle, source lumineuse distincte ; b) surface lumineuse, sources non distinguables. Source : Charlotte Angerand.....	48
Figure 24: Schéma de détermination des pertes potentielles de territoire liées à la lumière. Source : Charlotte Angerand	54
Figure 25 : Schéma explicatif de la fragmentation de la Trame Biodiversité par la lumière. Source : Charlotte Angerand	55
Figure 26 : Modélisation de la Trame Lumière, situation actuelle. Source : Charlotte Angerand	58
Figure 27 : Surfaces lumineuses par catégories selon les canaux rouge, vert et bleu. Source : Charlotte Angerand	59
Figure 28 : Modélisation de la Trame Biodiversité. Source : Charlotte Angerand	60
Figure 29 : Surfaces perdues de la Trame Habitats dû à la Trame Lumière actuelle. Source : Charlotte Angerand	61
Figure 30 : Modélisation des fractures lumineuses de la Trame Biodiversité face à la Trame Lumière actuelle. Source : Charlotte Angerand	62
Figure 31 : Modélisation de la Trame Lumière, scénario 2030. Source : Charlotte Angerand	63
Figure 32 : Surfaces perdues de la Trame Habitats dû à la Trame Lumière du scénario 2030. Source : Charlotte Angerand	64
Figure 33 : Modélisation des fractures lumineuses de la Trame Biodiversité face à la Trame Lumière du scénario 2030. Source : Charlotte Angerand	65
Figure 34 : Graphique comparatif des surfaces perdues de la Trame Biodiversité dû à la Trame Lumière actuelle et du scénario 2030. Source : Charlotte Angerand	66
Figure 35 : Graphique de comparaison du nombre de fractures lumineuses sur la Trame Biodiversité, entre la situation actuelle et le scénario 2030. Source : Charlotte Angerand	67
Figure 36 : Graphiques des surfaces lumineuses (canaux rouge, vert et bleu) sur la Trame Habitats et selon les catégories établies. Source : Charlotte Angerand	68
Figure 37 : Modélisation de la typologie d'espaces établie sur le Parc naturel. Source : Charlotte Angerand.....	70
Figure 38 : Différences possibles entre le travail en plan et la réalité. Source : Charlotte Angerand	81

Table des tableaux

Tableau 1 : Longueurs d'onde du spectre lumineux. Source : MEB - ANPCEN, 2015	9
Tableau 2 : exemples de valeurs d'éclairement (lux) de différents éléments ou situations. Source : MEB - ANPCEN, 2015; Siero, 2019	11
Tableau 3 : échelle de Bortle. Source : Deverchère et al., 2018	13
Tableau 4 : Longueurs d'onde ayant un impact avéré sur la Flore. Source : Verny & Busson, 2018	18
Tableau 5. Espèces de chiroptères présentes sur le territoire de Belgique selon leur sensibilité connue à la lumière. Source : Charlotte Angerand, basé sur Nugroho, 2013; Plecotus, n.d.	22
Tableau 6 : Longueurs d'onde ayant un impact avéré sur le monde du vivant. Source : Charlotte Angerand, basé sur MEB - ANPCEN, 2015; Schroer & Hölker, 2016; Verny & Busson, 2018	23
Tableau 7 : Gestionnaires des réseaux de distribution d'électricité et de gaz en Wallonie et leurs zones d'action. Source : Charlotte Angerand	44
Tableau 8 : Récapitulatif des données disponibles pour les communes de Burdinne et Braives sur le Parc. Source : Charlotte Angerand, basé sur les communications des communes de Braives et Burdinne.....	50
Tableau 9 : Liste des sites de la catégorie 1 de la Trame Habitats du Parc naturel Burdinale-Mehaigne. Source : Charlotte Angerand, basé sur les données de la biodiversité de Wallonie.	53
Tableau 10 : Synthèse des habitats nécessaires à la chasse des espèces de chiroptères. Source : Charlotte Angerand, basé sur Didion et al., 2019; SPW, 2015	53
Tableau 11 : Hiérarchie des composantes des conflits éclairage-biodiversité. Source : Charlotte Angerand	57
Tableau 12: Synthèse des points de conflit éclairage-biodiversité pour le scénario 2030. Source : Charlotte Angerand	68
Tableau 13: Synthèse des points de conflit éclairage-biodiversité pour le scénario 2030 compris dans la typologie d'espaces définie. Source : Charlotte Angerand	71
Tableau 14 : Synthèse des points de conflit éclairage "autoroute"-biodiversité pour le scénario 2030 compris dans la typologie d'espaces définie. Source : Charlotte Angerand	72
Tableau 15 : Synthèse des émissions lumineuses en conflit avec la biodiversité comprises dans la typologie d'espaces établies. Source : Charlotte Angerand	72

ANNEXES

ANNEXE 1

Sélection des luminaires pour réaliser des mesures de la zone tampon lumineuse selon les types de lampes et hauteurs.

Nombre de luminaires du Parc naturel Burdinale-Mehaigne selon le type de lampes et la hauteur de l'éclairage. a : Luminaires du réseau public hors autoroute ; b : luminaires d'autoroute.

a) Hauteur (m)	Sodium Basse Pression	Sodium Haute Pression	Vapeur de Mercure Iodure	LED	Autre	Total
3			8			8
4	3	2	12		8	25
5	7	11	32			50
6	27	28	37			92
7	71	6	3	9		89
8	168	59	9	24	1	261
9	2445	470	32	421		3368
10	345	224	2	65		636
11	24	7		4		35
12	1					1
13	3					3
Total	3094	807	135	523	9	4568

b) Hauteur (m)	Luminaire "Autoroute"
0	8
6	14
8	29
10	48
12,5	249
20	117
Total	465

Sur les 4568 luminaires du réseau RESA hors autoroute du Parc naturel Burdinale-Mehaigne, les familles de lampes les plus représentées sont les SBP, SHP, LED, puis Vapeur de mercure. Les hauteurs les plus représentatives des luminaires du Parc est 9m, puis 10m, puis 8m.

Ainsi les typologies hors autoroute les plus représentées sont les suivantes :

- SBP, 9m : 2445 unités
- SHP, 9 m : 470 unités
- LED, 9m : 421 unités
- SBP, 10m : 345 unités
- SHP, 10m : 224 unités
- SBP, 8m : 168 unités

Pour les 465 luminaires d'autoroute, la hauteur de la représentée est 12,5m (249 unités), puis 20m (117 unités).

La sélection des luminaires pour les mesures se base également sur leur isolement et accessibilité. Une analyse des données RESA a mis en évidence l'absence de luminaires SHP de 10m isolés, cette typologie n'a pas été sélectionnée pour les mesures. Concernant les luminaires d'autoroute, les éclairages à 20m de hauteur ne sont pas accessibles pour des raisons de sécurité.

Pour chacune des autres typologies énumérées ci-dessus, 2 luminaires ont été sélectionnés afin de réaliser les mesures du halo lumineux. A cela ont été ajoutés deux lampes à Vapeur de Mercure (de hauteur 6m et 9m).

La réalité de terrain a cependant réduit l'échantillon (présence d'autres luminaires à proximité non cartographiés). Le tableau suivant présente les luminaires où les mesures ont été réalisées, leur typologie et leurs coordonnées GPS.

Coordonnées GPS en Lambert 72 des luminaires sélectionnés pour les mesures in situ.

Type de lampe	Hauteur (m)	Coordonnées (Lambert 72)
Sodium Basse Pression	8	200744.74 ; 136960.49
	9	202715.6 ; 139144.2
	9	202651.07 ; 138810.35
Sodium Haute Pression	10	212407.7 ; 138930.5
	8	202929.6 ; 138972.7
	8	204600.7 ; 148283.3
Vapeur de Mercure	9	205615.9 ; 147579.0
	6	207712.20 ; 142019.30
LED	9	204785.38 ; 141486.42
	9	202087.79 ; 141207.29
Autoroute	9	201932.08 ; 139302.28
	12,5	199420.7 ; 142148.3
Autoroute	12,5	205266.9 ; 147819.6
Point de contrôle		201718.29 ; 143535.34

Mesures réalisées le 17 juillet 2020, entre 22h42 (premier étalonnage) et 3h18.

Récapitulatif des résultats obtenus pour chaque mesure

Lampe Sodium Basse Pression

heure de mesure	3h18		3h00		2h30		23h32	
	Hauteur : 8m		Hauteur : 9m		Hauteur : 9m		Hauteur : 10m	
Hauteur de l'éclairage								
Direction des mesures	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥
mesure n°1 : 0m	10,7	10,7	5,4	5,4	4,6	4,6	7,3	7,3
mesure n°2 : 5m	9,1	6,3	4,1	4,4	3,7	3,5	5,2	4,5
mesure n°3 : 10m	4	-	2,8	x	2,1	x	3,2	x
mesure n°4 : 15m	1,8	x	1,7		1,2		1,9	
mesure n°5 : 20m	1,1		1		-		1	
mesure n°6 : 25m	-		x				-	
mesure n°7 : 30m	x							

Lampe Sodium Haute Pression

heure de mesure	2h40		00h38		1h00	
	Hauteur : 8m		Hauteur : 8m		Hauteur : 9m	
Hauteur de l'éclairage						
Direction des mesures	//	⊥	//	⊥	//	⊥
mesure n°1 : 0m	26,5	26,5	26,9	26,9	18,2	18,2
mesure n°2 : 5m	16,9	28,5	17,8		12,1	
mesure n°3 : 10m	7,9	x	7,4	6,1	5,7	11,9
mesure n°4 : 15m	3,4				4,7	
mesure n°5 : 20m	2,6				3	
mesure n°6 : 25m	-				<u>3,8</u>	
mesure n°7 : 30m					<u>5,5</u>	

Lampe Vapeur de Mercure

heure de mesure	00h06		01h30	
	Hauteur : 6m		Hauteur : 9m	
Hauteur de l'éclairage				
Direction des mesures	//	⊥	//	⊥
mesure n°1 : 0m	49,1	49,1	9,4	9,4
mesure n°2 : 5m	25,2	12,1	4,9	12,7
mesure n°3 : 10m	8,4	2	1,7	
mesure n°4 : 15m	3,6		1,4	
mesure n°5 : 20m	3,4		1	
mesure n°6 : 25m	1,8		<u>1,4</u>	
mesure n°7 : 30m	1,8		<u>3,6</u>	
mesure n°8 : 35m	1,9		<u>9,4</u>	
mesure n°9 : 40m	1,9		-	
mesure n°10 : 45m	-		-	

Lampes LED

heure de mesure	2h20		2h00	
	Hauteur : 9m		Hauteur : 9m	
Hauteur de l'éclairage				
Direction des mesures	//	⊥	//	⊥
mesure n°1 : 0m	9,2	9,2	7,1	7,1
mesure n°2 : 5m	7,3	9,4	6,2	5,6
mesure n°3 : 10m	3,7	4	3,1	x
mesure n°4 : 15m	2	-	1,5	
mesure n°5 : 20m	1		-	
mesure n°6 : 25m	-			

Luminaire Autoroute

heure de mesure	3h40		4h01	
	Hauteur : 12,5m		Hauteur : 12,5m	
Hauteur de l'éclairage				
Direction des mesures	//	⊥	//	⊥
mesure n°1 : 0m	22,7	22,7	23,6	23,6
mesure n°2 : 5m	20,2	26,1	21	22,5
mesure n°3 : 10m	11,8	20,4	11,8	19,8
mesure n°4 : 15m	6,5	-	10,3	x
mesure n°5 : 20m	3,5	-	3,9	
mesure n°6 : 25m	1,5		2,2	
mesure n°7 : 30m	-		-	
mesure n°8 : 35m	-		-	

// Mesure parallèle à la route

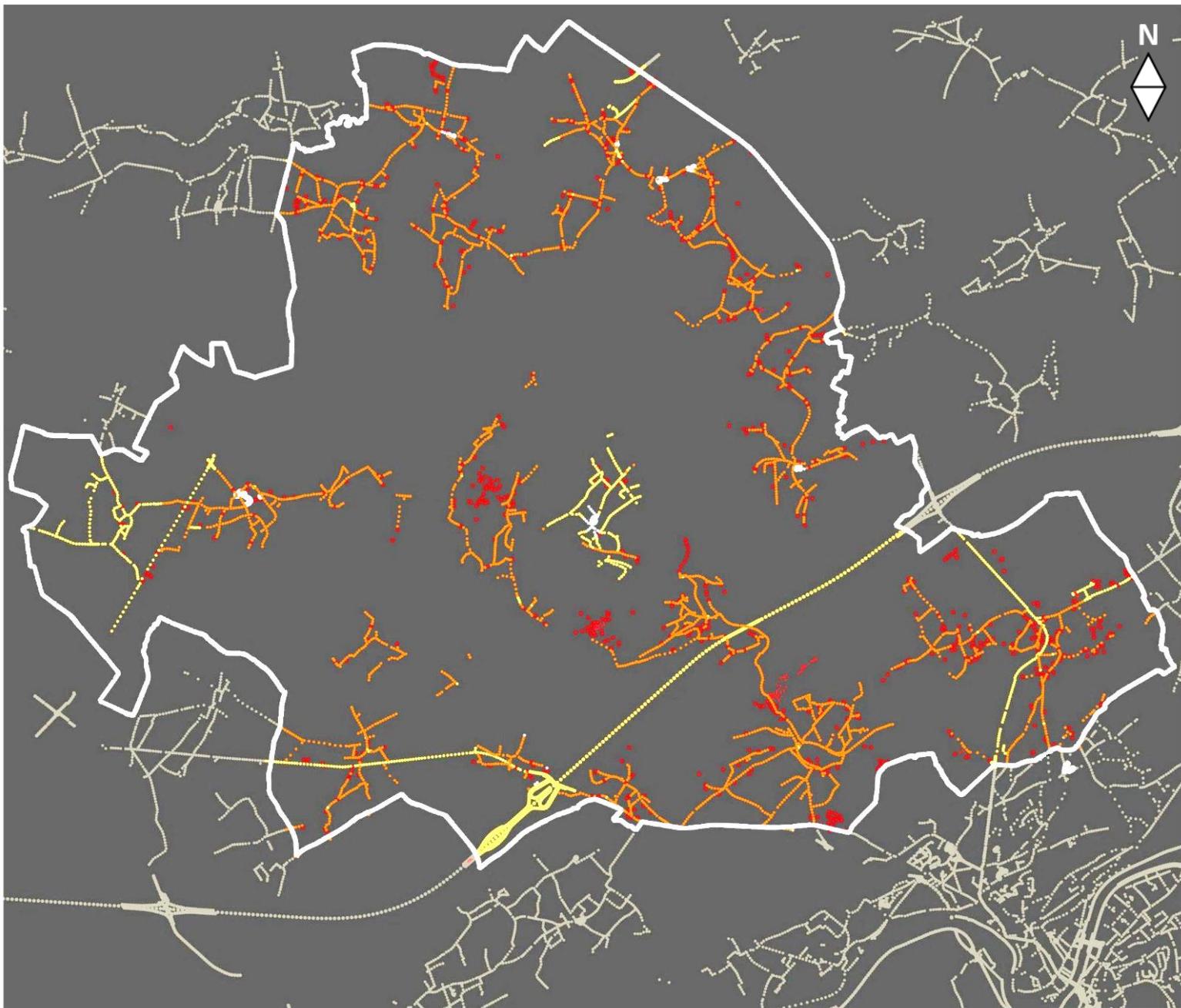
⊥ Mesure perpendiculaire à la route

- Lux non détectable

x Obstacle pour la mesure (domaine privé)

0,00 Présence d'un second lampadaire pouvant influencer les mesures

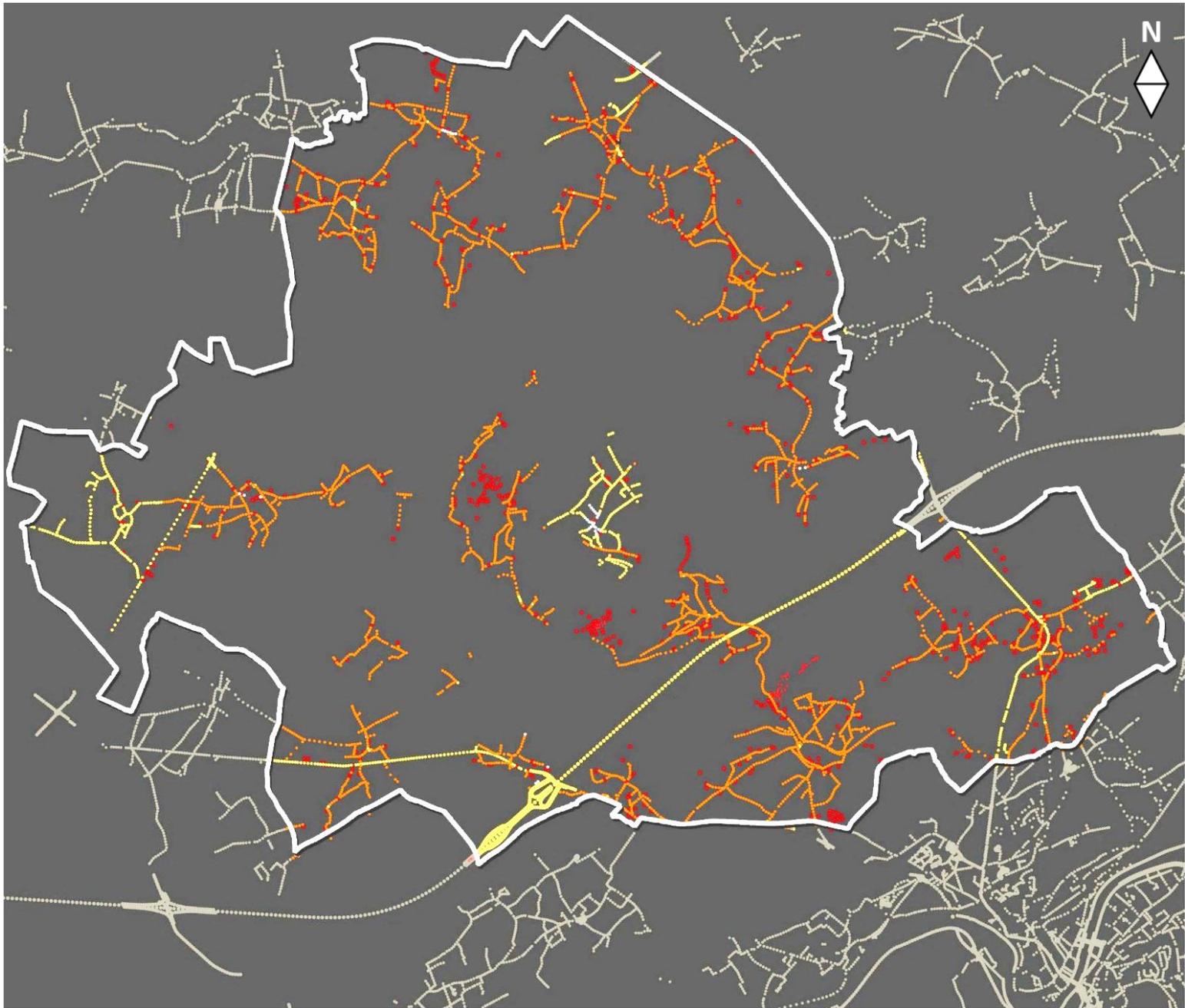
Trame Lumière, situation actuelle : début de soirée (20h)



Légende

- | | | |
|---|---|--|
|  Lampe Sodium Basse Pression |  Lampe Vapeur de Mercure |  Contour du Parc naturel Burdinale-Mehaigne |
|  Lampe Sodium Haute Pression |  Emissions lumineuses autres |  Trame lumineuse principale autour du Parc |

Trame Lumière, situation actuelle : cœur de nuit (00h)



Légende

-  Lampe Sodium Basse Pression
-  Lampe Sodium Haute Pression

-  Lampe Vapeur de Mercure
-  Emissions lumineuses autres

-  Contour du Parc naturel Burdinale-Mehaigne
-  Trame lumineuse principale autour du Parc

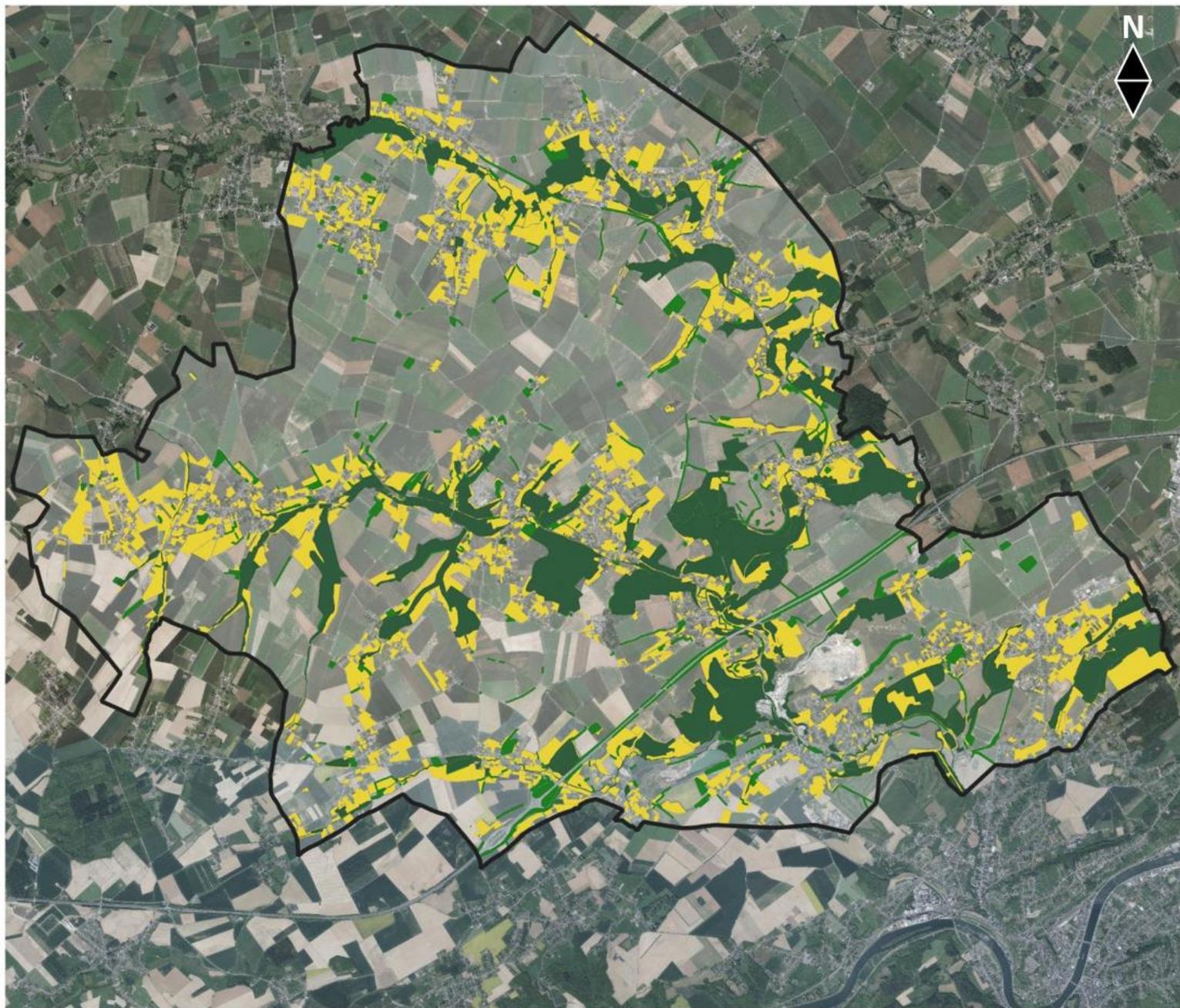
0 1 000 m

Résultats de l'analyse des émissions lumineuses (ortho-photographie nocturne)

Surfaces des émissions lumineuses selon les catégories établies. Détail selon les canaux rouge, vert et bleu. Nombre de luminaires identifiés.

			Surfaces des émissions lumineuses			
			Rouge	Vert	Bleu	Surface totale (ha)
Commerces	Luminaires identifiés	121 luminaires	2,02	2,01	0,97	5,00
	Surfaces lumineuses	-	0,40	0,52	0,28	1,20
Surface totale (ha)			2,42	2,53	1,25	6,20
Eglise et cimetière	Luminaires identifiés	3 luminaires	0,02	0,01	0,00	0,03
	Surfaces lumineuses	-	-	-	-	-
Surface totale (ha)			0,02	0,01	0,00	0,03
Gare, école, loisirs	Luminaires identifiés	16 luminaires	0,06	0,10	0,11	0,27
	Surfaces lumineuses	Ecole communale de Fallais	0,21	0,17	0,03	0,41
		Ecole de l'ancienne Abbaye du Val Notre-Dame	0,17	0,15	0,05	0,36
Surface totale (ha)			0,44	0,42	0,19	1,05
Industrie et activité agricole	Luminaires identifiés	78 luminaires	1,86	2,50	1,13	5,49
	Surfaces lumineuses	Carrière de Moha	2,88	3,04	1,43	7,35
Surface totale (ha)			4,73	5,54	2,56	12,84
Particulier	Luminaires identifiés	310 luminaires	2,02	1,47	0,81	4,30
	Surfaces lumineuses	-	-	-	-	-
Surface totale (ha)			2,02	1,47	0,81	4,30
Pénitencier	Luminaires identifiés	33 luminaires	0,90	0,98	0,30	2,17
	Surfaces lumineuses	-	0,87	0,74	0,35	1,96
Surface totale (ha)			1,77	1,72	0,64	4,13
Voiries	Luminaires identifiés	439 luminaires	3,93	2,74	0,57	7,24
	Surfaces lumineuses	-	-	-	-	-
Surface totale (ha)			3,93	2,74	0,57	7,24
Surfaces d'émission totales sur le Parc naturel (ha)			15,33	14,42	6,03	35,78

Trame Habitats



Légende

0 1000 m

Trame Habitats

-  Catégorie 1
-  Catégorie 2
-  Catégorie 3

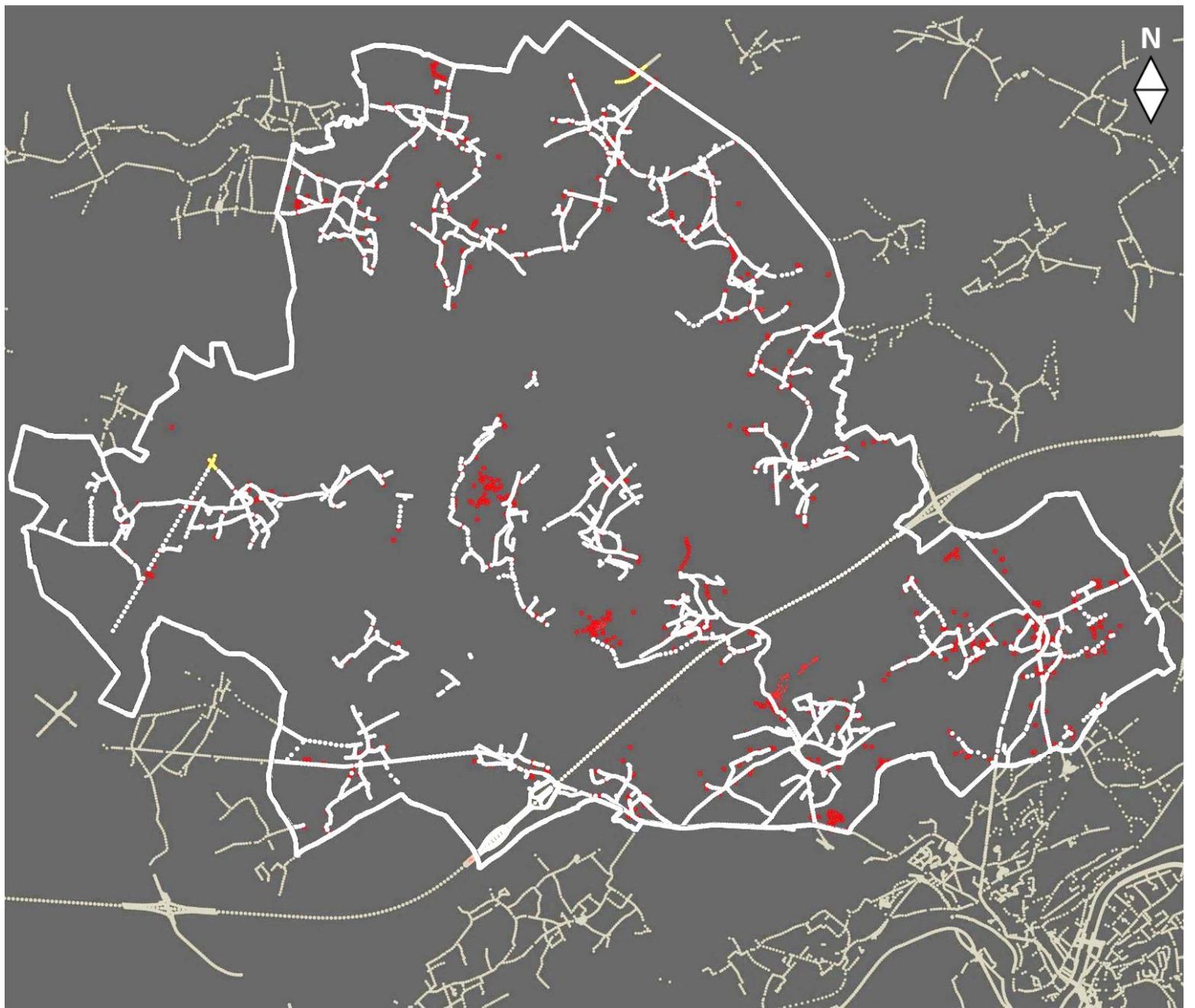


Légende

0 1000 m

- *Rhinolophus hipposideros*, 2017
 - ▽ Point de contact avec des chiroptères, 2016.
 - Relevé des gîtes estivaux de chiroptères, 2016.
- | | | |
|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1 : <i>Pipistrellus sp.</i> 2 : espèce(s) non identifiée(s) 3 : <i>Pipistrellus sp.</i> 4 : <i>Plecotus sp.</i> 5 : <i>Plecotus sp.</i> 6 : <i>Myotis sp.</i>, <i>Pipistrellus sp.</i> 7 : <i>Myotis mystacinus</i>, <i>Plecotus sp.</i> 8 : <i>Pipistrellus pipistrellus</i> 9 : <i>Eptesicus sp.</i>, <i>Plecotus sp.</i> | <ul style="list-style-type: none"> 10 : <i>Plecotus sp.</i> 11 : espèce(s) non identifiée(s) 12 : <i>Plecotus austriacus</i> 13 : <i>Myotis sp.</i> 14 : <i>Myotis sp.</i>, espèce(s) non identifiée(s) 15 : <i>Myotis sp.</i>, <i>Pipistrellus sp.</i> 16 : <i>Myotis mystacinus</i>, <i>Pipistrellus sp.</i> 17 : espèce(s) non identifiée(s) 18 : <i>Pipistrellus sp.</i>, <i>Plecotus sp.</i> | <ul style="list-style-type: none"> 19 : espèce(s) non identifiée(s) 20 : espèce(s) non identifiée(s) 21 : espèce(s) non identifiée(s) 22 : <i>Pipistrellus sp.</i>, <i>Plecotus sp.</i> 23 : <i>Pipistrellus sp.</i> 24 : <i>Pipistrellus sp.</i> 25 : <i>Plecotus sp.</i> 26 : <i>Pipistrellus sp.</i> |
|---|--|---|
- ■ Liaison écologique

Trame Lumière, scénario 2030 : début de soirée (20h)

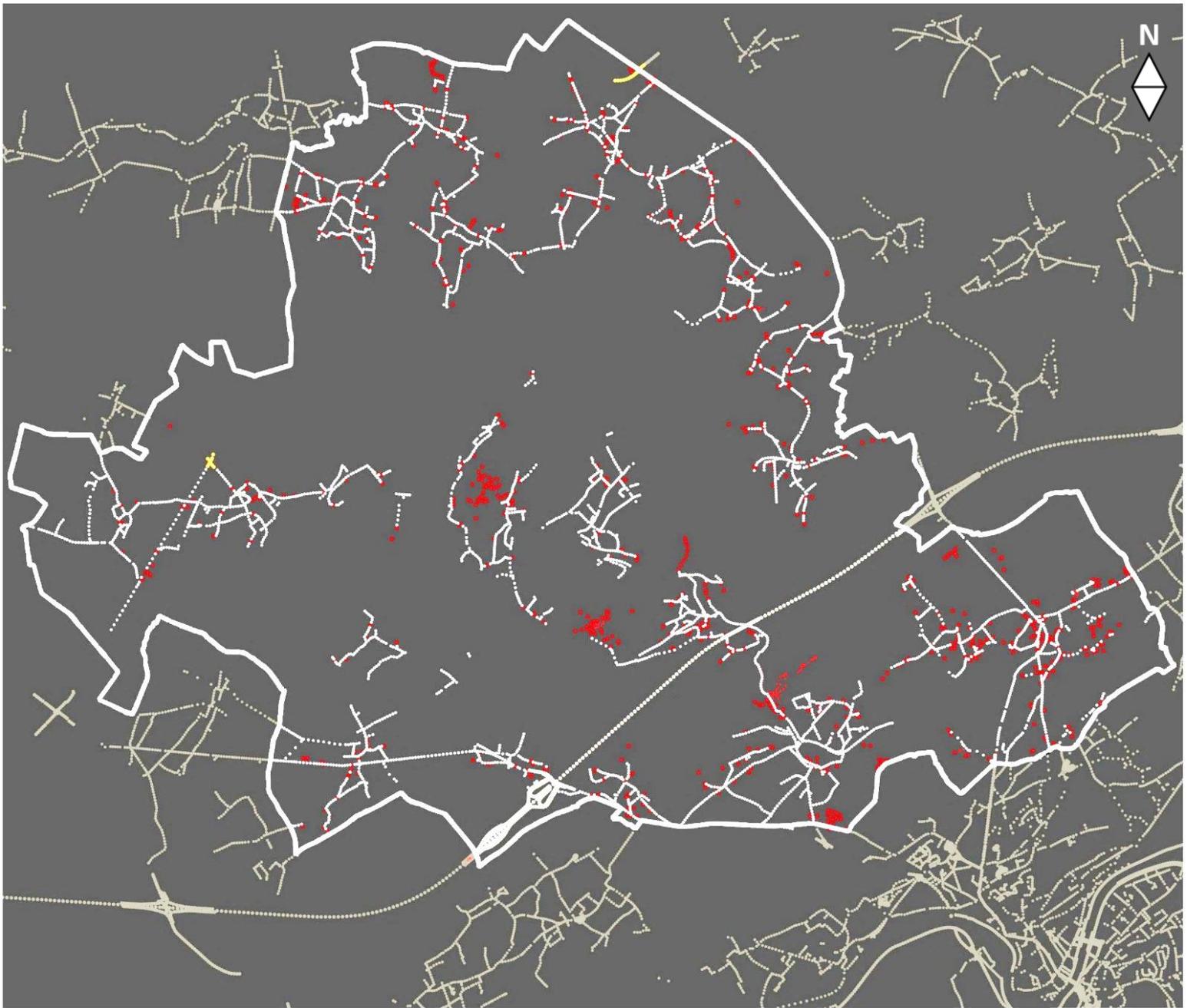


Légende

 Lampe Sodium Haute Pression
 LED

 Emissions lumineuses autres

 Contour du Parc naturel Burdinale-Mehaigne
 Trame lumineuse principale autour du Parc



0 1 000 m

Légende

- | | | | | | |
|--|-----------------------------|---|---|---|--|
|  | Lampe Sodium Haute Pression |  | Emissions lumineuses autres |  | Contour du Parc naturel Burdinale-Mehaigne |
|  | LED |  | Trame lumineuse principale autour du Parc | | |

