



ETUDE POLLUTION LUMINEUSE

Site de Loire-Authion



Version initiale février 2023
Version mise à jour décembre
2023

Sommaire

Introduction

Page 03

- La pollution lumineuse et ses enjeux
- La méthodologie de l'étude
- Le contexte du projet

Page 04

Page 10

Page 15

L'état initial de l'environnement nocturne

Page 19

- Analyse de données
- Les enjeux globaux de la pollution lumineuse sur la biodiversité
- Les enjeux locaux sur la biodiversité
- Les enjeux locaux sur les habitats et la cohérence écologique
- Les enjeux humains
- Conclusion de l'état initial de l'environnement nocturne

Page 20

Page 30

Page 36

Page 46

Page 53

Page 55

Simulation de la pollution lumineuse du futur projet

Page 56

- Modélisations prédictives
- Conclusions sur les simulations des projets

Page 57

Page 64

Les effets probables du projet

Page 65

- Etude des impacts du projet
- Eviter et réduire les impacts
- Les mesures correctrices

Page 66

Page 78

Page 83

Conclusion non-technique

Page 89

Préconisations générales

Page 91

Annexes

Page 95

Introduction

La pollution lumineuse et ses enjeux



Qu'est ce que la pollution lumineuse

La pollution lumineuse est un phénomène anthropique induit par une mise en lumière via un éclairage artificiel d'un environnement durant la période nocturne.

Définition d'une pollution : « La pollution est l'introduction d'un **agent chimique, physique ou biologique** au sein d'un **environnement**, à l'origine de dégradations par rapport à la **normale**». Dict. Larousse.

A partir de ce constat, il est possible de traduire la relation entre la lumière et le terme de pollution :

- La lumière est un **agent physique** composé d'ondes électromagnétiques, auquel est définie une sensation visuelle. Le spectre visible est la zone du spectre électromagnétique à laquelle l'espèce humaine est sensible. Ce spectre peut être différent pour certaines espèces faunistiques.
- L'environnement traité dans le cadre de la description de la pollution lumineuse est **l'environnement nocturne**. Il est défini par une dimension spatiale terrestre ou aquatique. Il est aussi déterminé par une dimension temporelle entre période de jour et période de nuit.
- La normale est une ressource générale issue des conditions naturelles de l'environnement. La ressource normale est ici **l'obscurité**.

La définition permet d'affirmer et de comprendre la pollution lumineuse comme : « La **pollution lumineuse** est l'introduction d'une **lumière artificielle** au sein d'un **environnement spatial et temporel**, à l'origine de dégradations de **l'obscurité normale**».

Le rythme nyctéméral qui conditionne la vie sur Terre :

Le rythme nyctéméral, ou alternance jour/nuit, correspond à un cycle biologique de 24h auquel toute forme de vie est adaptée. Ce rythme se rapporte à plusieurs phases induites par la luminosité et la température, mais aussi l'humidité et d'autres paramètres climatiques journaliers. La période nocturne se découpe en plusieurs séquences :

- Le crépuscule : débutant à partir du coucher du soleil, le crépuscule se caractérise par une luminosité et des températures en baisse et une humidité qui s'élève.
- La nuit : suivant le crépuscule, elle se caractérise par une absence totale de lumière directe du soleil (excepté la lumière de la lune et des étoiles), la température chute et l'humidité s'élève. Il existe plusieurs sous-séquences qui accompagnent les rythmes de vie (exemple : le pic d'activité des insectes nocturnes se situe plutôt en début de nuit, alors que les mammifères (grand gibier) connaissent un pic d'activité plutôt en seconde partie (alors qu'il n'y a pas de distinction connue pour la migration nocturne de l'avifaune concernée).
- L'aube : dernière séquence de la période nocturne, l'aube débute avec les premières lueurs du soleil jusqu'au lever, elle se caractérise par la température moyenne la plus basse de la journée et l'humidité la plus élevée.

Chaque phase du rythme nyctéméral est primordiale pour la biodiversité ainsi que pour l'être humain. L'introduction de lumière artificielle dans un environnement induit une modification de la luminosité et peut nuire à l'ensemble des séquences de la nuit.

La pollution lumineuse va être à l'origine de la perturbation du rythme nyctéméral par la modification des conditions normales d'obscurité.



Les causes de production de pollution lumineuse

Des paramètres aux effets différents :

À partir du moment où il y a une production de lumière artificielle, dans un environnement il y a une production de pollution lumineuse, et donc de possibles impacts non négligeables sur l'équilibre des écosystèmes. Néanmoins, ces impacts vont être plus ou moins perturbants pour la biodiversité, en fonction de paramètres techniques de ces sources de production de lumière.

Ces perturbations peuvent être différentes selon la réponse d'une espèce aux paramètres identifiés. Ainsi, une espèce peut être perturbée par un certain paramètre, alors qu'une autre n'en sera pas sensible. L'étude de la pollution lumineuse va donc chercher à mettre en exergue ces paramètres clés des éclairages et définir les impacts en fonction des espèces locales présentes dans l'environnement du projet et de leur réponse spécifique pour chaque paramètre.

Plusieurs types de pollution lumineuse :

Pour une exhaustivité dans la compréhension et l'analyse des enjeux, il faut noter que l'approche déployée va explorer deux types de pollution lumineuse :

- **La pollution lumineuse directe** : qui concerne les impacts de la lumière directement produits par les flux lumineux et dépendant de leurs caractéristiques propres.
- **La pollution lumineuse indirecte** : qui résulte d'une accumulation de conditions de production de lumière qui va impliquer une ambiance lumineuse modifiant les conditions normales d'obscurité. Appelée aussi **halo lumineux**, cette ambiance peut être produite à des distances importantes des sources lumineuses par diffusion dans l'atmosphère.

Les paramètres influençant la pollution lumineuse

Il est présenté ici les principaux paramètres techniques des éclairages qui vont avoir une influence sur le degré d'impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité, sur la santé et plus globalement sur la participation des sources au halo lumineux et son renforcement.

1. L'orientation des flux :

La direction dans laquelle émet un point lumineux va être un facteur important dans la notion d'impacts :

- Un lampadaire qui émet un flux uniquement en direction d'une zone d'intérêt au sol, soit ce qui doit être éclairé (route, trottoir, parking, etc.) sera plus efficace, gaspillera moins d'énergie et sera plus adéquat pour réduire les impacts de la pollution ;
- Dans ce sens, l'ensemble des sources qui vont produire un flux lumineux au-delà de la zone d'intérêt, en direction de l'environnement proche (milieux naturels, façades) seront à l'origine d'une augmentation des impacts. Les flux lumineux qui sont orientés directement en direction du ciel est le premier contributeur au halo lumineux.
 - La part de flux de lumière émise par une source en direction du ciel est appelée l'**ULOR**, (Upward Lighting Output Ratio) qui se calcul en pourcent.

2. La couleur des flux :

Le deuxième facteur majeur d'impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité est la question de la couleur des flux. Comme on a pu le voir, la lumière est une émission de longueur d'ondes, plus ou moins courtes. C'est cette taille de longueurs d'ondes qui va influencer la couleur des flux. Plus elles sont courtes, plus la lumière se rapproche de l'ultra-violet, plus elles sont longues, plus le spectre sera dans l'infra-rouge.



Les causes de production de pollution lumineuse

Ce qu'on sait aujourd'hui des longueurs d'ondes, c'est que les plus courtes, donc avec des couleurs plus froides (blanc froid, violet, bleu, vert) sont plus nocives pour un grand nombre d'espèce. La réponse de la biodiversité est moins marquée pour les longueurs d'ondes les plus longues (rouge, orange, jaune).

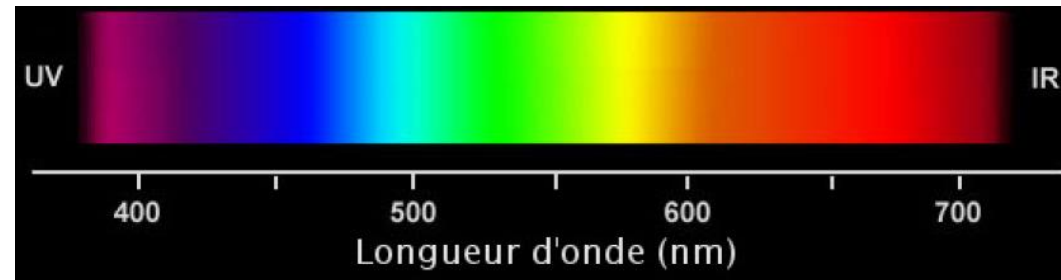
Si la majorité des taxons sont sensibles aux courtes longueurs d'ondes, il est cependant important de noter que la réponse des espèces n'est pas uniforme à cette question de couleur de flux. Certaines sont plus sensibles aux couleurs chaudes qu'aux couleurs froides. Pour cela, un tableau par taxon a été produit pour identifier les réponses principales pour chaque taxons et servira de référence dans l'étude des impacts de la lumière sur la biodiversité locale du site.

Autre fait important sur les couleurs des flux, c'est que les courtes longueurs d'ondes ont un pouvoir supérieur de diffusion dans l'atmosphère (effet Rayleigh). Ou, plus concrètement, les lumières qui émettent dans le bleu, blanc froid, vont être visibles de plus loin et vont participer à un halo plus intense et de plus grande surface.

3. L'intensité et la réverbération :

La question de l'intensité, qui est directement tributaire de la puissance de la source, est un point central de cumul d'effets dans l'étude de la pollution lumineuse. En effet, ce paramètre va orienter l'ensemble des autres paramètres polluants. Plus l'intensité du flux est importante, plus les causes seront importantes et donc plus les impacts seront forts. Par exemple, un flux assez bien maîtrisé mais très intense pourra avoir plus d'impact qu'un flux peu intense même s'il est moins bien maîtrisé.

De plus l'intensité augmente la réverbération de la lumière par le sol et donc implique une émission de lumière en direction du ciel même sans ULOR.



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



4. Autres facteurs de pollution lumineuse

D'autres facteurs sont recherchés pour comprendre et étudier la production de pollution lumineuse :

- **La hauteur des mâts** : paramètre qui intervient dans une dimension de nuisances pour la biodiversité. Plus les points sont hauts, plus ils peuvent avoir des effets d'éblouissement des espèces et risquent d'être visibles de plus loin. Également, une grande hauteur de mâts implique une zone éclairée au sol plus grande et un risque plus élevé de déperdition de lumière dans l'environnement proche.
- **Concentration de point lumineux** : plus les points lumineux sont concentrés, plus il y a un risque de produire des impacts. Même si les flux sont maîtrisés et n'éclairent qu'en direction du sol, le sur-éclairage combiné avec la réverbération sera une source de renforcement de la pollution lumineuse directe et du halo lumineux.
- **La période d'éclairage** : les périodes de la nuit les plus propices pour la biodiversité sont le crépuscule et début de nuit ainsi que l'aube. Les éclairages qui fonctionnent durant ces plages de nuit seront plus impactants (néanmoins, ce sont les périodes où la société a le plus de besoins en éclairage). Cependant, tout éclairage éteint en cours de nuit sera meilleur qu'un éclairage allumé tout au long de la nuit.
- **Les zones éclairées** : enfin la localisation géographique et l'environnement éclairé est le dernier paramètre source d'enjeux. Une route éclairée dans une forêt aura plus d'impact qu'une source en milieu urbain.



Les principaux impacts de la pollution lumineuse :

Les impacts écologiques :

Que ce soit la faune, la flore, la fonge (champignons) ou de manière générale l'équilibre des écosystèmes, l'ensemble des êtres vivants exposés à de la lumière artificielle peuvent être perturbés. Les espèces diurnes ont besoin de l'obscurité pour entrer en phase de sommeil alors que les espèces nocturnes ont besoin de l'obscurité pour se nourrir, se reproduire, se déplacer ou encore migrer.

Il existe plusieurs types de réponses de la faune face à l'éclairage :

- **Phototaxie positive** : l'espèce va être attirée par la lumière. Ce phénomène est un réflexe biologique des espèces qui sont attirées par la source lumineuse, se trouvant désorientées et/ou piégées au sein des flux lumineux. C'est le cas des insectes nocturnes notamment, mais aussi des oiseaux migrateurs.
- **Phototaxie négative** : l'espèce va être repoussée ou gênée par la lumière. Dans un souci de camouflage et pour éviter d'être vu par leurs prédateurs, ces espèces vont fuir la lumière et vont se retrouver dans des espaces toujours plus restreints. C'est le cas de nombreux mammifères et reptiles ou encore des crapauds qui ne chantent plus en présence de lumière.
- **Opportunisme** : dans le cadre des relations proies /prédateurs, certaines espèces prédatrices ont compris les réponses de leurs proies et vont venir en profiter. C'est le cas par exemple des araignées qui construisent leur toile sous les lampadaires pour attraper les insectes nocturnes à phototaxie positive... Ce phénomène modifie fortement les relations « proie/prédateur ».

Barrière écologique : la pollution lumineuse devient une barrière écologique qui entrave la cohérence des écosystèmes. Au même titre qu'une infrastructure, la faune n'a plus la capacité de traverser une rangée continue de lampadaire.

La pollution lumineuse impacte aussi la flore, notamment sur la qualité de la photosynthèse et des cycles saisonniers. Les effets sur la fonge sont encore au stade d'étude, mais déjà plusieurs expériences ont montré un lien possible sur le développement de certains champignons.

Impacts sanitaires :

Tout comme la faune diurne, l'Homme a besoin de la lumière comme de l'obscurité. La nuit et ses différentes séquences, sont indispensables pour le bon fonctionnement de son horloge biologique. La présence de lumière repousse le moment de l'endormissement, diminue la sécrétion d'hormones (notamment la mélatonine, l'hormone du sommeil) entraînant fatigue, anxiété et stress. Plusieurs autres corrélations entre lumière et santé sont soupçonnées et sont en cours d'études.

Impacts sur le ciel étoilé :

La présence de halos lumineux empêche la vision de l'ensemble du paysage étoilé. De nombreuses étoiles et la voie lactée, ne sont plus visibles dans les espaces urbanisés et parfois sur plusieurs kilomètres. Ce problème est particulièrement limitant pour les activités des astronomes amateurs et professionnels sur le territoire français, et pour les habitants qui ne peuvent plus jouir du paysage étoilé (patrimoine commun reconnu).

Impacts sur le gaspillage énergétique et changement climatique :

La pollution lumineuse est indirectement liée au gaspillage énergétique et au changement climatique. La mauvaise gestion, l'utilisation inadaptée aux besoins, l'utilisation d'appareils énergivores induisent un gaspillage énergétique et d'émission de CO2 (le parc d'éclairage public représente 5,6 TWh soit plus de 500 KteqCO2 en France).

La méthodologie de l'étude



La méthodologie déployée s'appuie sur 4 grandes phases :

1. L'élaboration de l'état initial de l'environnement nocturne, avant le projet.
2. La scénarisation prédictive de la production de la pollution lumineuse par le projet.
3. L'étude des impacts du projet.
4. Les solutions pour éviter et réduire les impacts.

La méthode proposée doit permettre de couvrir l'ensemble des facteurs de pollution lumineuse et de comparer les enjeux pour l'environnement nocturne à l'état initial avec l'état projeté et d'estimer les impacts probables du projet. Ce document est avant tout un outil d'analyse et d'aide à la décision pour prendre en compte l'environnement nocturne face aux enjeux de mise en lumière du site.

Informations complémentaires par rapport à la méthode :

La méthodologie proposée est issue de nombreuses années d'expériences et de tests pour tenter d'avoir une vision concrète des enjeux pour l'environnement nocturne. *BL évolution* a ainsi déployé de nombreux outils (notamment de modélisation) et des connaissances et expertises pour répondre au mieux à cette problématique.

Il est cependant important de noter que la question de la pollution lumineuse dispose d'un socle de connaissances solide mais qui reste un sujet relativement récent avec certaines incertitudes. C'est le cas par exemple de la réponse des espèces, où certains taxons sont bien mieux connus que d'autres. *Ainsi nous avançons au rythme de la recherche scientifique.*

Elaboration de l'état initial :

L'état initial de l'environnement nocturne poursuit l'objectif d'établir un état des lieux de la composante nocturne de l'environnement avant la réalisation du projet. Cet état initial servira de référence dans l'étude, il sera comparé avec la simulation prédictive de la pollution lumineuse du projet pour définir les incidences négatives sur l'environnement nocturne.

Cet état initial de l'environnement nocturne est établi selon 3 étapes :

1. **La collecte de données.** L'objectif est d'identifier et caractériser les sources d'éclairage proches et la qualité de l'obscurité du ciel du site à l'intérieur d'un périmètre défini. La collecte des données est réalisée par des prises de mesures directement effectuées sur le terrain au cours d'une nuit.*
2. **La modélisation de la pollution lumineuse directe et indirecte à l'état initial.** La modélisation est construite à partir des données récoltées sur le terrain ainsi que par l'étude de diverses sources de données accessibles (notamment par images satellites). Il découlera une analyse globale de la pollution lumineuse sur le périmètre du projet et notamment l'analyse du halo lumineux qui peut être influencé par des sources se trouvant hors du périmètre du projet.
3. **La caractérisation des enjeux sur les contextes de biodiversité et de santé humaine.** Les enjeux sont établis à partir des données produites dans le cadre de l'inventaire faune/flore, de l'étude de l'occupation du sol et du bâti. Elles sont complétées par des observations issues de la phase de terrain. La caractérisation est établie à partir du croisement entre les enjeux issus de ces inventaires et les enjeux de la pollution lumineuse sur la biodiversité locale. Une étude des habitations riveraines vient compléter l'analyse des enjeux.

* Les modalités de la collecte de données sont précisées en annexe du document



La scénarisation prédictive de la production de la pollution lumineuse par le projet

L'objectif de cette deuxième phase est d'estimer l'influence du futur projet sur la production de pollution lumineuse. Dans ce sens, nous établissons une modélisation de la pollution lumineuse directe et indirecte du projet à partir des données fournies. Ces données sont principalement les emplacements et périmètres du projet ainsi que les exigences réglementaires d'éclairage pour un tel ouvrage. À partir de ces données génériques nous établissons une simulation des émissions de lumière.

La modélisation prédictive est établie sur un scénario donné, dans une temporalité particulièrement anticipée par rapport au projet. A ce stade, nous ne disposons pas d'emplacement précis des sources lumineuses, ni de leurs caractéristiques techniques. En revanche nous disposons des objectifs moyen et minimum d'éclairage au sol. A partir de cela nous réalisons un calcul de l'éclairage et affectons un coefficient de diffusion de lumière pour une simulation possible de la production de pollution lumineuse et de la qualité de l'obscurité du ciel.

La simulation permet d'exprimer la production de **pollution lumineuse directe** (éclairage uniquement) et de **pollution lumineuse indirecte**.

L'étude des impacts du projet

L'objectif de cette phase est d'identifier l'inflexion de l'environnement nocturne en présence du projet. Pour cela, nous réalisons une estimation de l'impact qu'aura le projet par rapport à l'état initial, en considérant l'état projeté.

L'état projeté prend donc en compte les émissions de pollution lumineuse directe et indirecte et doit permettre d'évaluer les impacts probables qu'aura le projet sur l'environnement nocturne.

Pour cette phase, les données d'entrées sont extraites de l'analyse initiale menée sur la faune et la flore et peuvent être complétées par des données supplémentaires (observations sur le terrain, trame verte et bleue par exemple).

Cette phase doit permettre de hiérarchiser les impacts afin de conduire et prioriser la recherche de mesures correctrices.

Les solutions pour éviter et réduire les impacts.

La dernière phase de notre méthodologie vise à produire des préconisations et solutions pour réduire et éviter les effets négatifs du projet. Nous recherchons à répondre au mieux aux enjeux identifiés dans l'étude d'impact pour définir des solutions techniques concrètes pour éviter et réduire les impacts. Néanmoins, une nouvelle fois, l'étude intervient à un stade où les éléments d'éclairage ne sont pas ou peu connus.

Ainsi les mesures correctrices proposées peuvent prendre la forme de préconisations et recommandations d'ordre générales pour s'assurer que le projet limite au maximum l'installation de certains paramètres clés qui seront particulièrement néfastes pour l'environnement nocturne local.



La particularité des unités

Les données et unités utilisées tout au long de cette étude peuvent présenter certaines particularités techniques qui sont expliquées ici. En effet, certaines sources de données peuvent être un peu complexe à se saisir. Ainsi ce chapitre cherche à expliquer, de manière la moins technique possible, les données et leurs unités.

Pollution lumineuse directe :

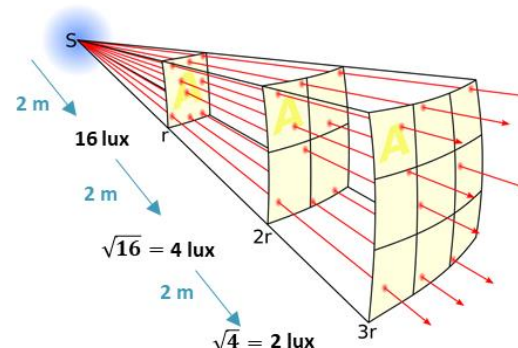
Les principales données utilisées pour comprendre la pollution directe sont le flux lumineux et l'éclairement.

- **Le flux lumineux** : le flux lumineux est la *grandeur photométrique** qui caractérise la puissance lumineuse d'une source. L'unité correspondante est le *lumen (lm)*. Il s'agit d'une donnée technique des sources connues (par connaissance du type et de la puissance de l'ampoule) mais qui n'est pas mesurable.
- **L'éclairement** : L'éclairement lumineux est lui mesurable et correspond à la sensation humaine sur la manière dont une surface reçoit un flux lumineux. Plus concrètement, il s'agit du quotient de flux lumineux reçu par un élément de surface (en m²). L'unité de l'éclairement est le **lux**. Un lux est donc :

$$1 \text{ lux} = \frac{1 \text{ lm}}{\text{m}^2}$$

L'éclairement dépend de la puissance lumineuse du flux mais aussi de la distance de la source lumineuse. C'est-à-dire que plus on s'éloigne de la source, plus l'éclairement diminue. Cette diminution est régie par la loi des carrés inverses.

Loi des carrés inverses :



La pollution lumineuse indirecte :

Pour la pollution lumineuse indirecte, les mesures et les unités sont nettement plus techniques, une nouvelle fois ce paragraphe nécessaire tente au mieux d'expliquer de manière synthétique et non technique les mesures. Deux mesures sont utilisées :

- **La radiance** : La radiance (ou luminance énergétique) est la puissance par unité de surface d'un rayonnement lumineux, dans un angle solide (en stéradian ou sr), émis en un point. Ce qu'il faut en comprendre c'est qu'il s'agit cette fois d'une mesure d'énergie et non d'une *grandeur photométrique*. Cette donnée, que l'on va utiliser, est issue d'une mesure prise par un satellite (qui porte le nom de VIIRS pour *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) qui va permettre de **comprendre l'émission de lumière en direction du ciel** et donc d'estimer la puissance de la source qui alimente le halo lumineux. Les données de radiance du satellite sont exprimées en nano-watt par centimètre carré par angle solide, soit :
 - **nW/cm²/sr**

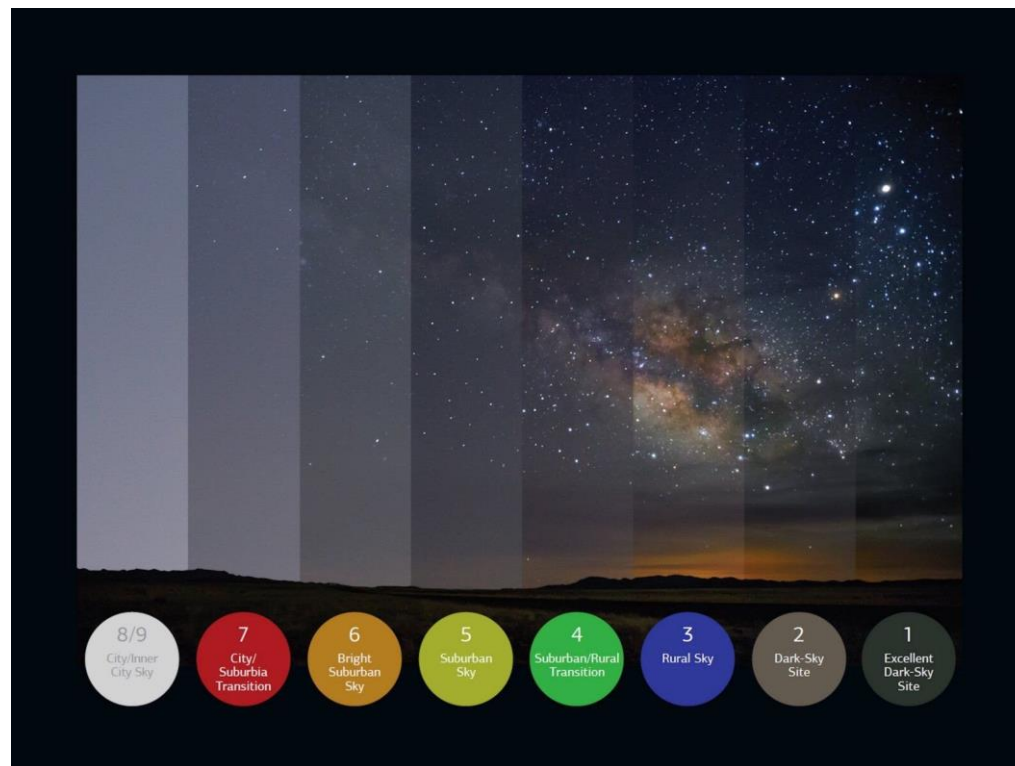
* A noter que lorsqu'on parle de grandeur photométrique cela implique une donnée ou une mesure qui est issue d'un ressenti par la vision **humaine**. Il s'agit donc d'une sensation visuelle de l'œil humain. Les ressentis de la faune peuvent être différents, mais ne peuvent être estimés.



Précisions sur les données

- La **magnitude par arc seconde** : peut-être la plus complexe des mesures, la magnitude par arc seconde est une donnée issue de l'astrophysique, qui correspond à une mesure de la *brillance d'une surface* d'un corps céleste et qui désigne la densité de flux reçue par unité d'angle solide. **Il faut comprendre cela comme une mesure de luminosité d'un objet.** Dans notre cas, l'objet mesuré est le ciel nocturne pour estimer sa luminosité en fonction de la lumière qu'il reçoit et de la diffusion de cette lumière dans l'atmosphère. **Il s'agit donc d'une variable permettant de donner une intensité au halo lumineux.** C'est à partir de cette mesure de l'intensité halo lumineux que nous comprenons la qualité de l'obscurité du ciel d'une zone. La magnitude est donnée en **mag/arcsec²**.
- Dans l'étude de la pollution lumineuse, ces unités sont bornées en moyenne entre 17,5 mag/arcsec² et 22 mag/arcsec². L'autre particularité complexe mais nécessaire à comprendre pour bien évaluer les résultats de l'étude, c'est qu'il s'agit d'une *unité impliquant une échelle logarithmique*. Pour faire simple, cela implique une analyse inversée dans la compréhension des résultats. C'est-à-dire : **une magnitude élevée implique une bonne obscurité** et à contrario, **une magnitude faible implique une obscurité de mauvaise qualité.**
- Cette qualité d'obscurité du ciel est mesurable avec un Sky Quality Meter (voir les outils de mesure en annexes) et peut aussi être estimée via une modélisation complexe pour passer de la radiance à la qualité de l'obscurité du ciel.

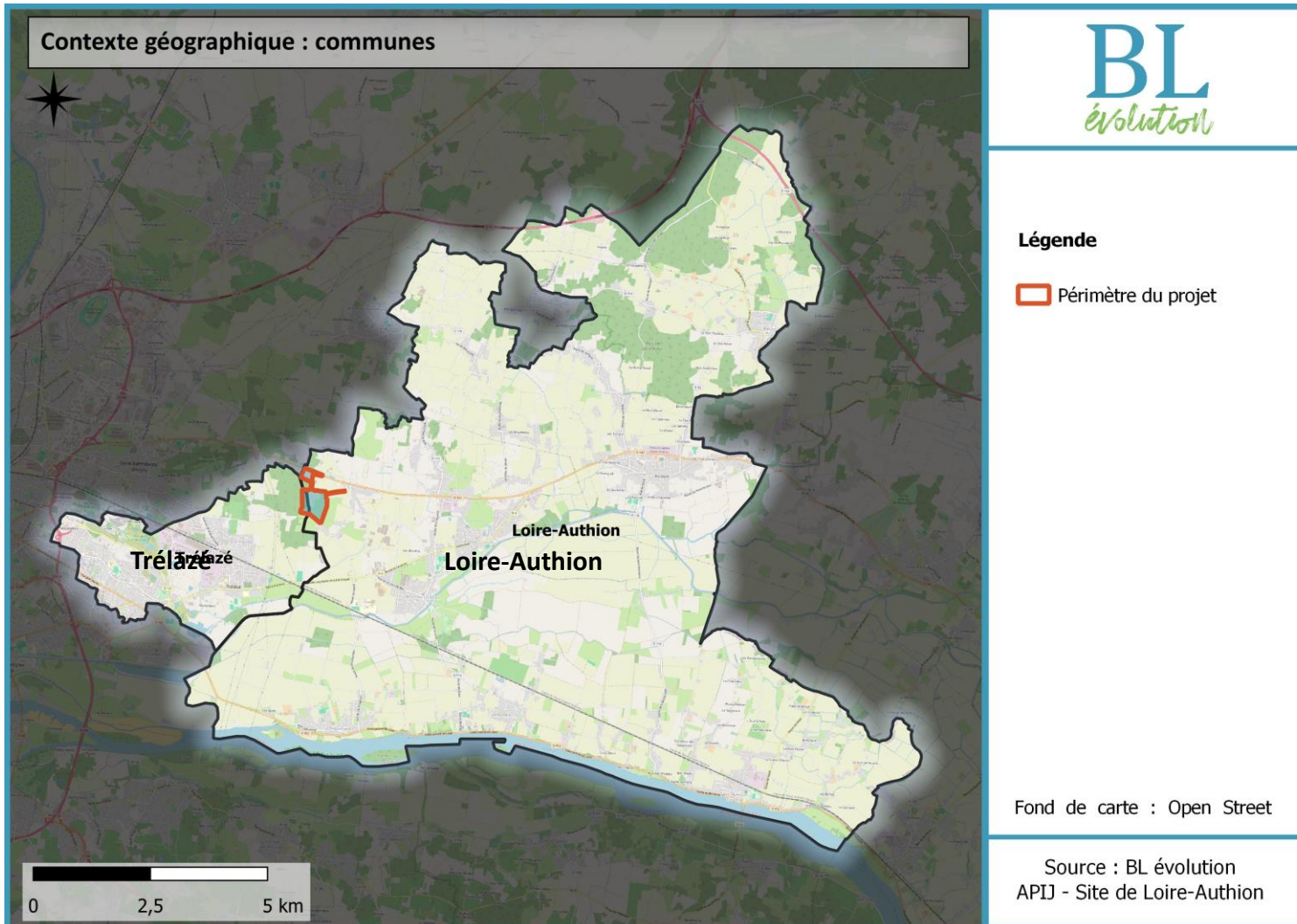
Pour rendre compte de cette implication, une échelle est proposée et comparée avec des caractéristiques urbaines :



Color Magnitude	Bortle Class	Sky Brightness	
		mag/arcsec ²	Artifi./Natural
7.6 - 8.0	1	>21.90	<0.01
7.1 - 7.5	2	21.90 - 21.50	0.01 - 0.11
6.6 - 7.0	3	21.50 - 21.30	0.11 - 0.33
6.3 - 6.5	4	21.30 - 20.80	0.33 - 1.00
6.1 - 6.3	4.5	20.80 - 20.10	1.00 - 3.00
5.6 - 6.0	5	21.1 - 19.10	3.00 - 9.00
5.0 - 5.5	6,7	19.1 - 18.00	9.00 - 27.0
<4.5	8,9	<18.00	>27.0

Le contexte du projet

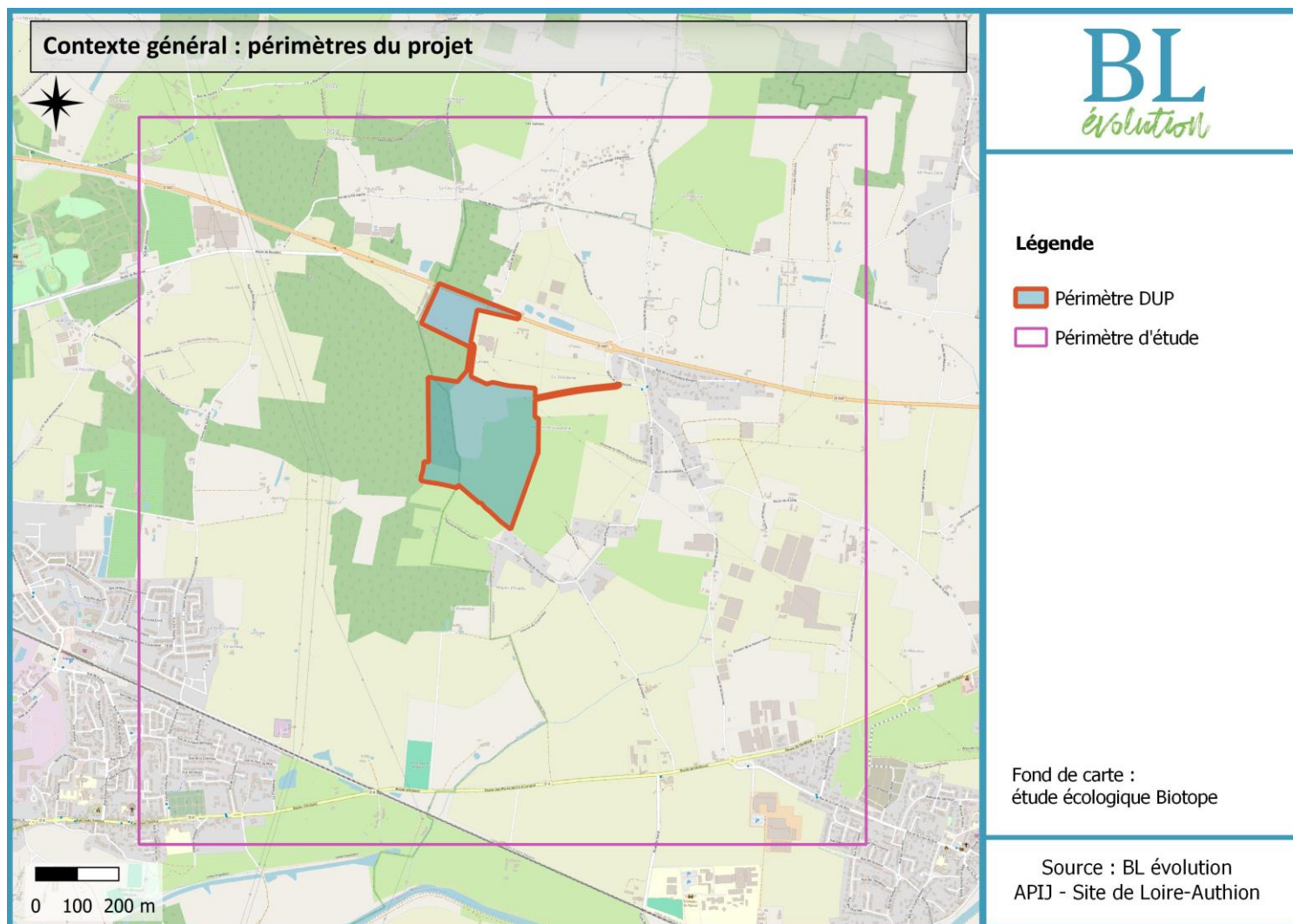
Contexte du site étudié



Ce travail entre dans le cadre de l'étude d'impact du futur projet d'établissement pénitentiaire (nommé EP dans cette étude) sur la commune de Loire-Authion. *BL évolution* a été sollicité pour étudier l'influence du futur projet sur l'environnement nocturne local dans le cadre de la production de pollution lumineuse. Cette étude se justifie par la volonté de déployer un projet éclairé sur l'ensemble de la nuit, avec des exigences réglementaires strictes sur l'éclairage, qui pourrait impacter l'ensemble de l'environnement nocturne, et notamment la faune et la flore.

Le projet se situe à cheval sur les communes de Loire-Authion et de Trélazé, situées dans le département de Maine-et-Loire (49), Région Pays-de-la-Loire.

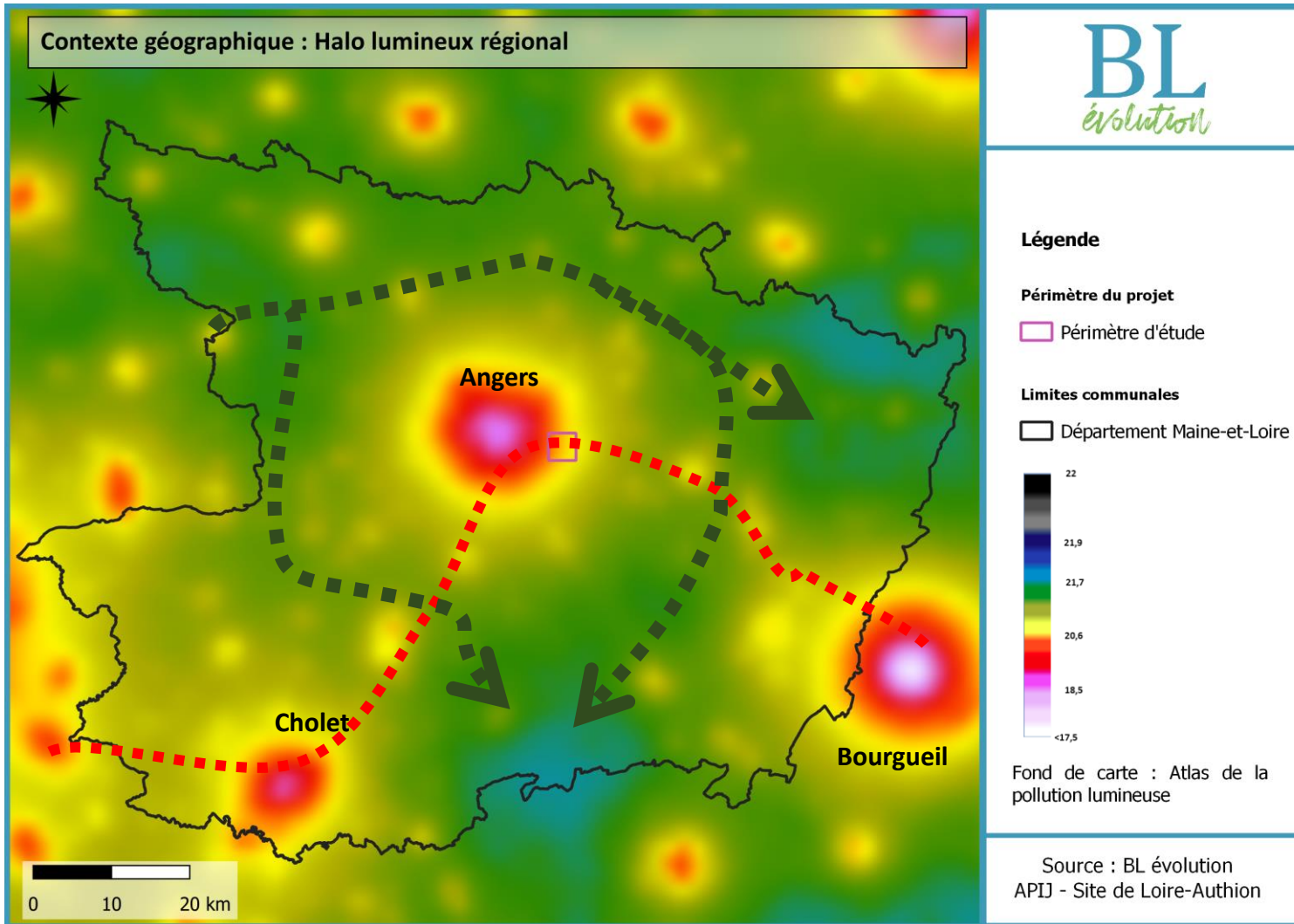
Définition des périmètres



Dans le cadre de l'étude de la pollution lumineuse, différents périmètres d'étude ont été définis pour mener le travail de spatialisation et de compréhension des enjeux nocturnes.

- Périmètre du projet : périmètre de la DUP du site d'étude transmis en amont et analysé dans le présent document.
- Périmètre d'étude du halo lumineux : il s'agit du périmètre défini pour analyser le halo lumineux et des éclairages. Le phénomène de pollution lumineuse, notamment indirecte, ne peut se limiter à la délimitation du projet. C'est notamment le phénomène de diffusion de la lumière dans l'atmosphère qui peut impliquer des impacts à plusieurs kilomètres autour d'une zone urbaine. *Cette zone d'étude s'étale sur un carré de 3,5km x 3,5km (soit 1250 ha), le tracé est choisi pour prendre en compte des zones urbanisées à proximité.*

Compréhension du contexte lumineux régional



- ➔ Continuités d'obscurité potentiellement favorables aux déplacements régionaux
- Continuité de halo lumineux à l'échelle régionale potentiellement défavorables pour la continuité écologique régionale

Pour mettre en contexte l'étude de la pollution lumineuse, il est pertinent de comprendre en amont le contexte régional de pollution lumineuse et du halo lumineux des agglomérations alentours.

L'atlas de la pollution lumineuse est une source de données issue d'un travail de recherche *opensource* qui permet de comprendre la diffusion du halo lumineux à l'échelle mondiale. Cet atlas, au vu de l'échelle étudiée, reste peu précis mais permet de comprendre le contexte dans lequel s'inscrit le projet.

La commune de Loire-Authion se situe dans des conditions d'obscurité au zénith qui sont fortement touchées par la diffusion générale du halo lumineux d'Angers.

Ainsi, il existe une certaine perméabilité du point de vue qui contourne la ville d'Angers, qui peut être favorable aux grands migrateurs par exemple. Mais le territoire d'étude reste dans un contexte régional peu favorable. Une certaine barrière régionale, plus ou moins perméable, peut être dessinée entre Bourgueil, Angers, Cholet, puis Nantes (non-visible sur la carte).

La suite de l'étude se penchera sur une analyse nettement plus locale.

Etat initial de l'environnement nocturne

Analyse des données initiales

La réalisation de l'état initial de l'environnement nocturne s'intéresse à l'étude des éclairages publics qui sont présents au sein du périmètre d'étude élargi. Chaque point lumineux a fait l'objet d'un recensement de sa localisation (GPS), des paramètres du point lumineux (type de lampadaire, ULOR, hauteur, type d'ampoule et températures de couleurs pour les LED), des caractéristiques des flux (éclairage (luxmètre) au sol et distance maximale d'influence lorsque mesurable).

Analyse des éclairages

Au total, 69 sources de lumière artificielle ont été recensées au cours de la collecte de données. Ce chiffre se veut être le plus exhaustif possible, il exclut cependant les possibles éclairages appartenant au domaine privé inaccessible, ou des sources qui n'étaient pas en état de fonctionnement au cours de la collecte (à priori aucune présente à proximité du projet EP de Loire-Authion).

Si le périmètre du projet ne dispose d'aucun point lumineux directement sur son périmètre, plusieurs sources sont présentes à proximité.

Parmi ces points lumineux, un seul type de lampadaire est identifié. Il s'agit d'éclairage de type voirie. Deux types d'ampoules ont été recensés :


- Des ampoules LED ;
- Des ampoules SHP.

Aucun éclairage privé n'est présent à proximité du périmètre.

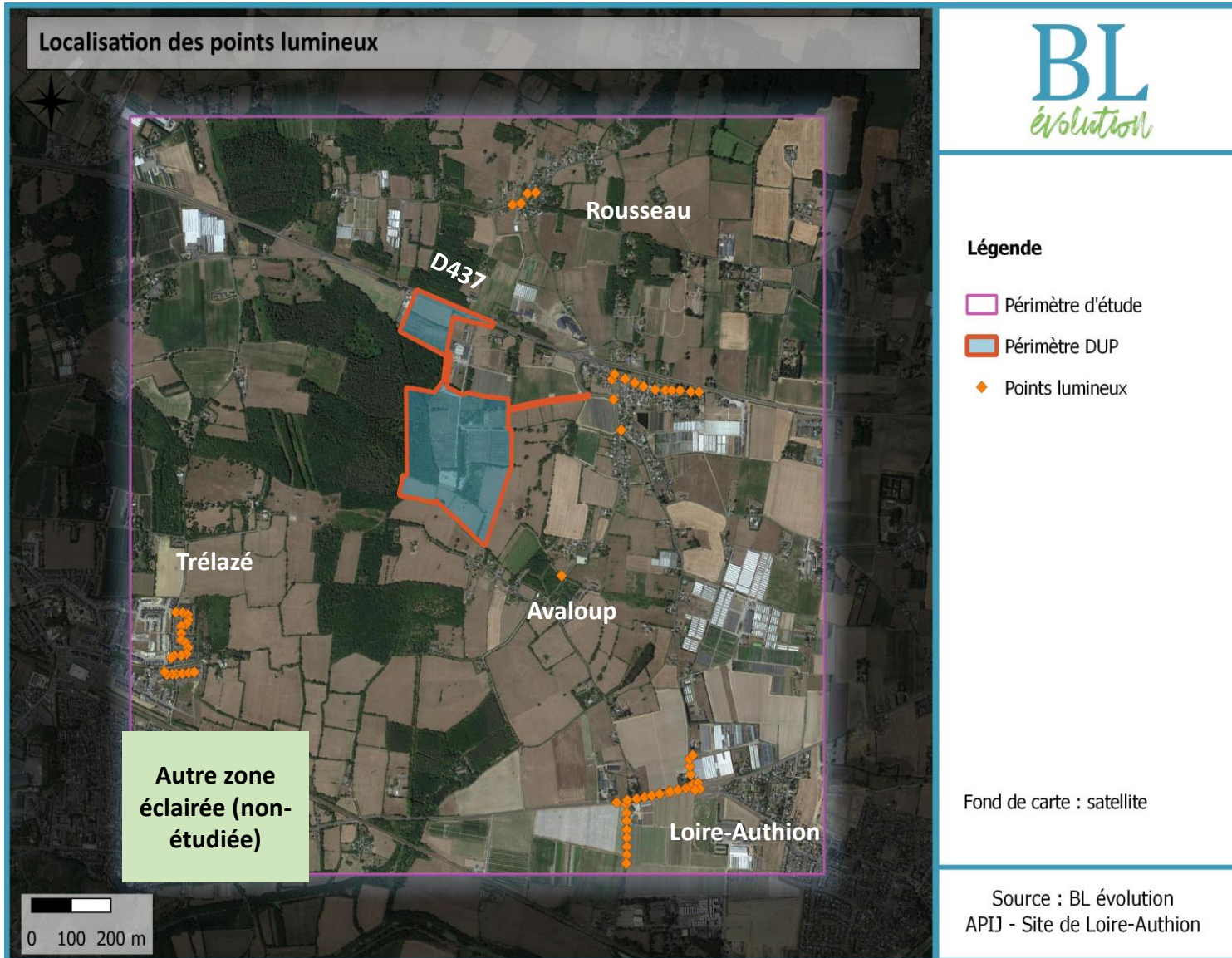
A noter que ces éclairages s'éteignent à 23h à l'exception des éclairages au sud-ouest.

Types d'éclairages rencontrés

Il s'agit d'éclairage de type routier, avec une hauteur de 6 à 8 mètres et des ampoules de type sodium haute pression sur la partie nord (voir carte page suivante) et des LED pour les éclairages à Trélazé et à Loire-Authion.

Eclairage voirie	
	
<p>Les éclairages de voirie sont des lampadaires classiques, avec une maîtrise des flux dépendant de la hauteur et une puissance variable.</p>	
<p>50 sources de type LED :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Intensité faible • Hauteur faible (6m) • Lumière blanche (3000K) • ULOR 0% <p>• Indice pollution lumineuse : moyen</p>	<p>19 sources identifiées de type SHP :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Intensité faible • Hauteur moyenne (8m) • Lumière orange • ULOR 5% <p>• Indice pollution lumineuse : faible</p>

Présence de points lumineux à proximité du projet



Analyse des éclairages

Les éclairages les plus proches se situent à l'est du périmètre d'étude, ainsi que dans le hameau de Rosseau (au nord de la D347). Un seul point lumineux est identifié à Avaloup, à une distance de 400m des limites du projet.

A une distance plus marquée (1,5km), des éclairages sont aussi présents au sud-ouest (sur la commune de Trélazé) et au sud-est, au niveau du centre-bourg de Loire-Authion.

A noter qu'à l'extrême sud-ouest, de très nombreux éclairages étaient présents, mais n'ont pas été mesurés car ils se trouvent à une distance très importante du projet (plus de 1,5km). Ces éclairages n'ont aucune influence sur le projet.

La méthodologie proposée par *BL évolution* est une modélisation cartographique de l'éclairement moyen d'une source. Reprenant des calculs de photométrie, le modèle permet une estimation fiable de l'éclairement moyen reçu au sol selon une maille à taille fixe.

L'éclairement est une donnée particulièrement pertinente pour permettre de visualiser le phénomène de pollution lumineuse directe et comprendre l'influence de chaque source lumineuse et de la conjugaison de l'ensemble des flux lumineux des sources.

La modélisation en tout point de l'éclairement moyen va dépendre de nombreux facteurs qui ont été calculés puis modélisés via un logiciel SIG et un outil de modélisation. La carte de l'éclairement suivante est créée de manière automatique à partir des principales données suivantes entrées dans le logiciel :

- La localisation du point lumineux ;
- L'angle du flux lumineux ;
- L'intensité estimée ;
- La hauteur des mâts.

L'éclairement moyen permet d'avoir une analyse spatialisée de la dynamique des flux lumineux présents sur le périmètre et des zones éclairées pour un pas fixé à 1m² pour estimer les zones les plus ou moins impactées. La dynamique d'éclairement permet aussi de déceler de potentiels « hotspots » de production de pollution lumineuse directe si de nombreuses sources sont présentes.

Interprétation :

Le passage de données ponctuelles de lumière à une spatialisation du flux lumineux peut impliquer quelques points de vigilance quant à l'interprétation :

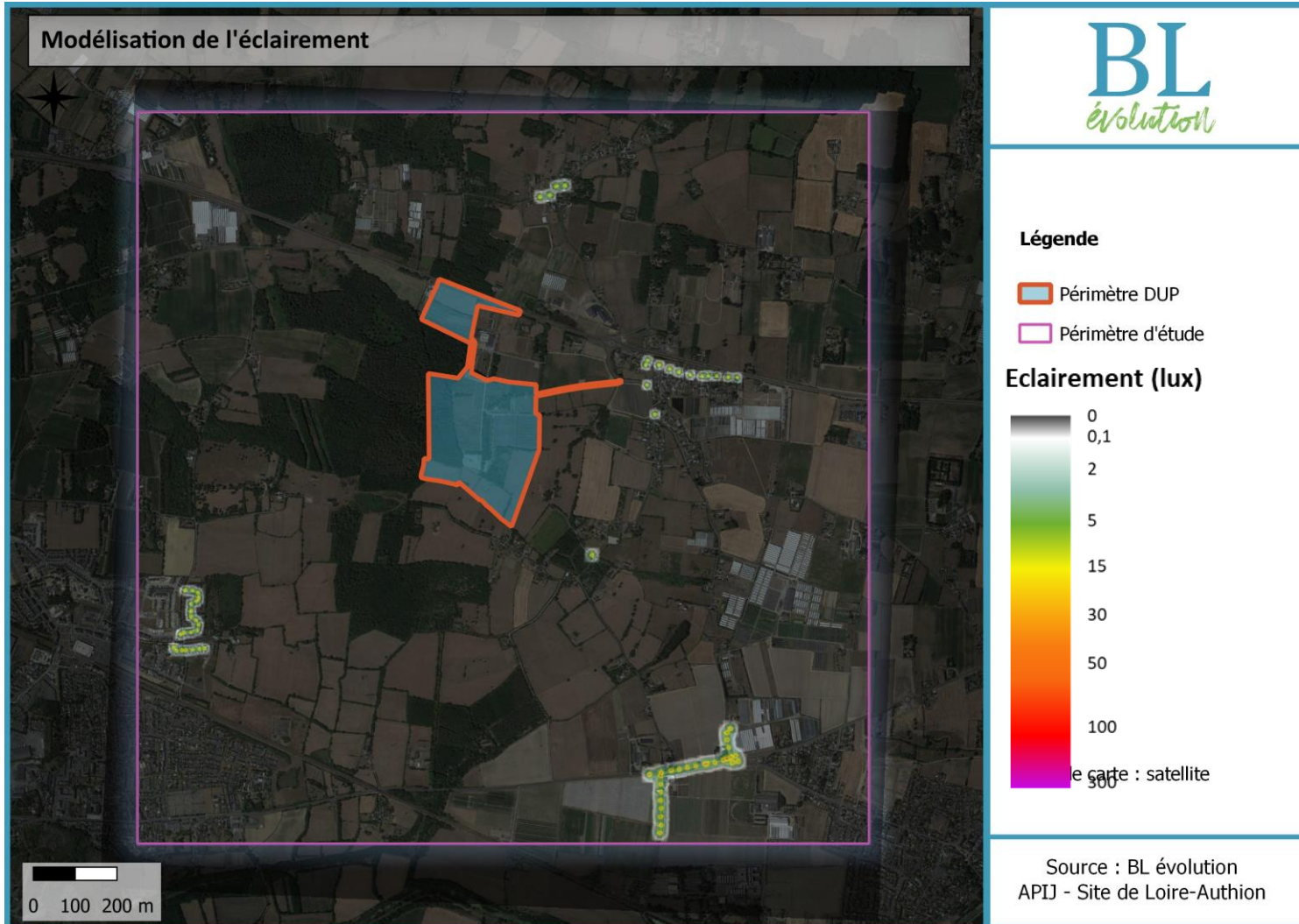
- Les sources lumineuses sont considérées lambertiennes. C'est-à-dire qu'il s'agit d'une source lumineuse dont la luminance est identique dans toutes les directions. Les possibles orientations des flux lumineux, qui nécessiteraient une exploration nettement plus importante (connaître la marque et le modèle de la lanterne) n'interviennent pas dans la modélisation.
- L'analyse est en deux dimensions. Cela implique que la diffusion réelle du flux pourrait être coupée par des éléments physiques (haies, bâtiments ou encore barrières). Néanmoins, dans les espaces ouverts ou partiellement ouverts (entre deux bâtiments) la modélisation de la distance joue un rôle majeur dans une perspective pour adapter l'éclairage.

Néanmoins, dans une analyse avec peu de points lumineux et dans le contexte périurbain auquel le projet est confronté, ces limites restent relatives et interfèrent peu sur l'interprétation finale.

L'éclairement moyen du site :

La carte suivante montre les résultats de la modélisation de l'éclairement. La limite d'éclairement de l'analyse est fixée à 0,1 lux. On notera que certaines espèces, comme certains amphibiens, peuvent être sensibles à un éclairage aussi faible. La lumière naturelle se situe autour de 0,1 lux (étoiles et voie lactée), la lumière de la pleine lune peut impliquer jusqu'à 1 lux au sol. Au-delà de 0,1 lux, les enjeux de pollution lumineuse directe sont considérés comme nul.

Cartographie de la pollution lumineuse directe à l'état initial



La modélisation de l'éclairage montre que le projet d'EP sur le site de Loire-Authion est particulièrement épargné par la présence de pollution lumineuse directe. Les principaux sites éclairés sont à une distance assez importante pour ne pas empiéter sur le périmètre de la DUP.

Cette présence très disparate et ponctuelle d'éclairage à l'état initial montre une zone particulièrement épargnée, avec une obscurité qui reste favorable pour la biodiversité et la santé humaine.

Définition d'une situation de référence

Pour étudier la pollution lumineuse indirecte, une campagne de mesure a été menée avec un appareil SQM. 18 mesures ont été prises au total. Pour rappel, l'étude se fait par deux types de données :

- Des données ponctuelles : l'opérateur se déplace pour qualifier l'obscurité sur des zones préalablement sélectionnées.
- Une donnée continue : un appareil (SQM LU-DL) fait une prise longue d'information durant toute la période de mesure (toutes les 5 mn).

La réalisation d'une prise de mesure en continu sur l'ensemble de la nuit va permettre de connaître l'évolution de la qualité de l'obscurité tout au long de la phase de collecte. Cette démarche est importante, car l'obscurité peut évoluer au cours d'une nuit. Notamment la présence de nuages peut perturber les mesures prises.

Les résultats de la prise longue vont donc servir de référence pour calibrer les autres données. C'est le différentiel entre la normale (moyenne) et les mesures qui va permettre de corriger et ajuster les données ponctuelles. Les réajustements restent relatifs mais importants pour une meilleure exhaustivité.

Le contexte des mesures

La période de collecte s'est déroulée la nuit du 24 au 25 janvier 2023. La collecte de données a démarré à partir de 20h00 et s'est terminée aux alentours de 2h00 du matin. La situation a été particulièrement stable lors de la nuit de mesure avec **une présence de nuages particulièrement importante**. La présence de nuages est un facteur déterminant de la luminosité du halo lumineux.

De manière générale, la nébulosité augmente l'intensité du halo lumineux dans les zones les plus polluées par la lumière. Et au contraire, les zones les plus éloignées des halos lumineux des villes ont un ciel plus sombre. Ainsi les nuages accentuent les données du SQM dans la situation d'un halo lumineux à proximité des villes et les minorent loin des villes.

Selon Tomasz Ściężor, l'impact peut aller jusqu'à +2mag/arcsec² en milieu urbains et -0,5mag/arcsec² en milieu sombre.

Situation de référence

Malgré cette problématique de la présence de nuages durant toute la nuit, il est nécessaire de définir une situation de référence à appliquer à toutes les mesures faites sur le terrain.

Pour cela, deux méthodes sont entrées pour adapter les données à une situation théorique sans nuage :

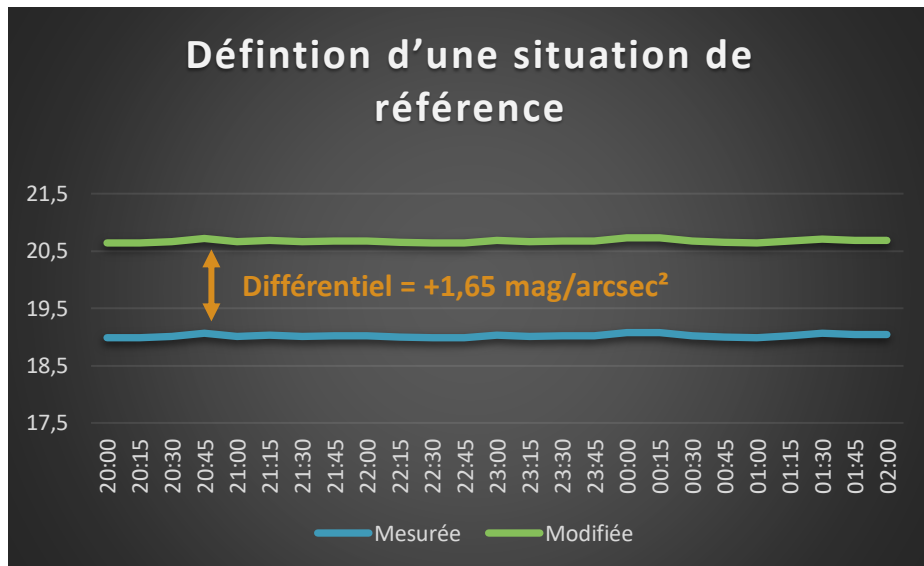
- Des données identifiées dans l'atlas de la pollution lumineuse : si celui-ci dispose de maille très large (1,1kmx1,1km), la magnitude de la maille sur le projet a été retenue (20,67 mag/arcsec² contre 19,00 mesuré le 24/01/2023)
- Un coefficient de tendance linéaire issu du travail de Tomasz Ściężor qui amène à une moyenne de 20,65 mag/arcsec² contre 19,00 mesuré le 24/01/2023).

Ainsi, étant dans une zone touchée par le halo lumineux de Angers, les données mesurées montrent une surestimation de l'intensité du halo. Une modification des mesures de plus 1,65 mag/arcsec² a été appliquée pour toutes les données mesurées afin de limiter cette surestimation.

Définition d'une situation de référence

Définition d'une situation de référence

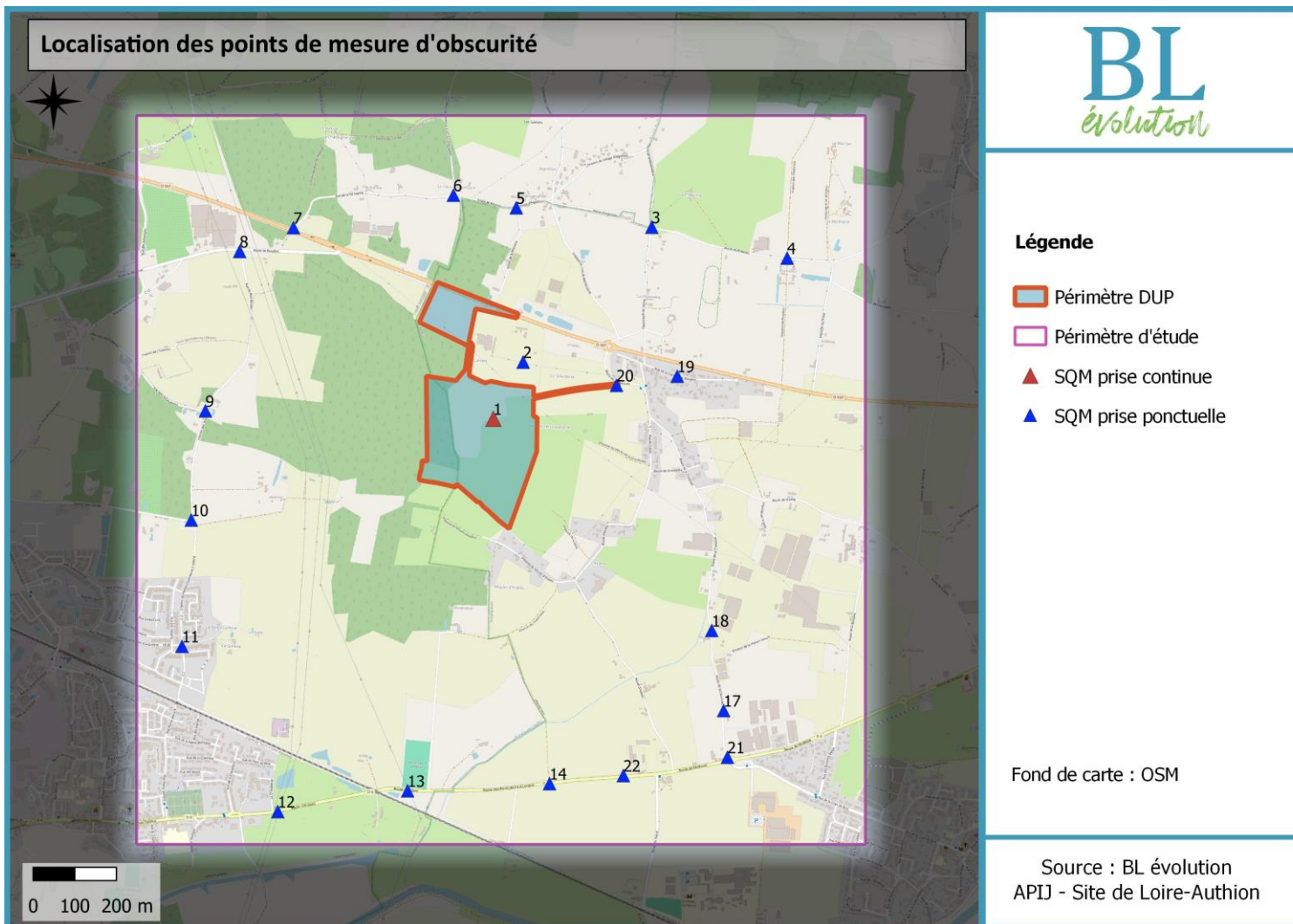
Ainsi, le graphique ci-dessous présente les résultats des mesures continues prises de 20:00 à 02:00 de la nuit du 24/01/2023 avec la situation de référence pour se substituer des artefacts dus à la présence de nuages.



Application de la modification aux données mesurées ponctuellement.

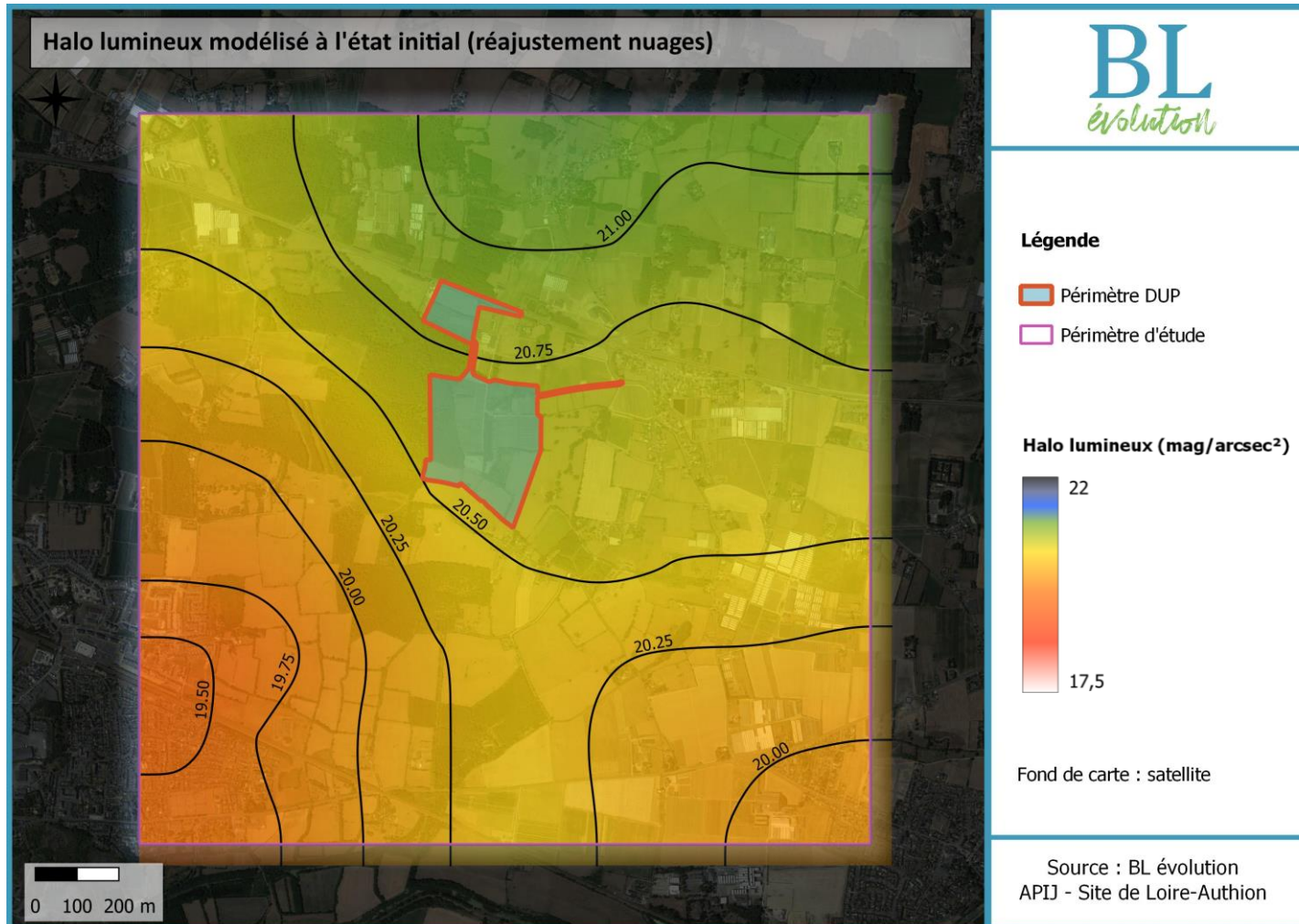
ID	Valeurs brutes mesurées	Valeurs retenues
1	19,05	20,70
2	19,16	20,81
3	19,28	20,93
4	19,28	20,93
5	19,38	21,03
6	19,38	21,03
7	18,95	20,60
8	18,95	20,60
9	18,40	20,05
10	18,28	19,93
11	17,77	19,42
12	18,05	19,70
13	18,55	20,20
14	18,76	20,41
15	18,36	20,01
16	18,36	20,01
17	18,36	20,01
18	18,57	20,22
19	18,94	20,59
20	19,04	20,69
21	18,36	20,01
22	18,58	20,23

Emplacement des prises de mesures



La carte ci-contre montre les points de mesures qui ont été pris durant la nuit du 24/01/2023.

La répartition se veut la plus représentative possible, en visant des zones clés, comme à proximité des zones éclairées et au plus proche du projet.



Carte de la modélisation de l'obscurité

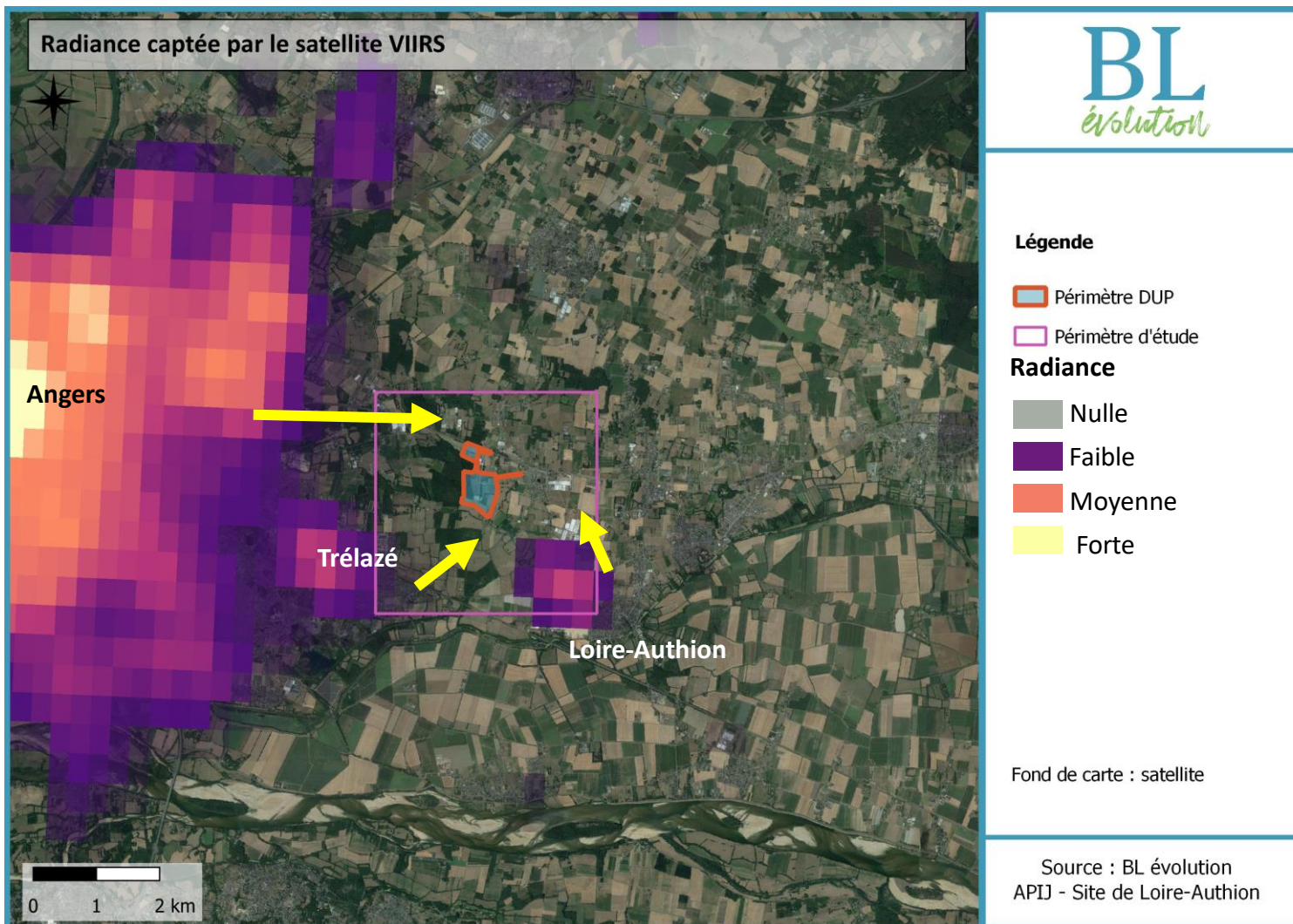
La modélisation du halo lumineux local montre une qualité d'obscurité du ciel oscillant entre 19,50 mag/arcsec² au sud-ouest et 21,00 mag/arcsec² au nord-est. Il s'agit d'un ciel typique de transition entre des sites suburbains et des sites ruraux.

Le halo lumineux est le plus important au sud-ouest, au niveau de la ville de Trélazé.

Il est aussi perceptible au niveau du centre-bourg de Loire-Authion, au sud-est, ainsi un halo lumineux léger a été capté lors de la prise de mesure sur le terrain.

Le périmètre du projet s'inscrit à la frontière d'une obscurité qui s'améliore en direction du nord. La magnitude est comprise entre 20,50 et 20,75 mag/arcsec².

On retiendra que la **qualité de l'obscurité est plutôt dégradée** sur le territoire d'étude, où l'influence assez forte de l'agglomération d'Angers s'estompe en direction du nord-est.



Carte de la radiance satellite

Le contexte de l'émission de lumière en direction du ciel :

Afin de valider ces résultats et comprendre la qualité de l'obscurité du ciel et sa dégradation, il est nécessaire de s'appuyer sur les données de radiance (émissions en direction du ciel) captée par le satellite VIIRS.

Le site connaît une altération locale de son obscurité uniquement par la présence de l'agglomération d'Angers à l'ouest, de Trélazé au sud-ouest et des espaces urbains de Loire-Authion au sud-est. L'analyse des radiances confirme qu'il y a d'importantes émissions de lumière directe à proximité du site. Les éclairages identifiés à proximité du projet sont trop peu nombreux pour être captés par le satellite

La principale source d'altération de l'obscurité sur le territoire d'étude s'explique ainsi par **un halo lumineux global venant des espaces urbains d'Angers.**

L'ensemble du nord-est du territoire est épargné par l'émission de lumière.

Les enjeux globaux de la pollution lumineuse sur la biodiversité

Les enjeux de pollution lumineuse

Parmi les taxons identifiés on retrouve les suivants :

- Les insectes ;
- Les amphibiens,
- Les reptiles
- Les oiseaux
- Les mammifères (hors chiroptère)
- Les chiroptères

L'analyse suivante présente les réponses des taxons à ces enjeux

La flore :

Les effets de la pollution lumineuse sont un élément relativement peu renseigné. La bibliographie scientifique s'accorde cependant sur le fait que la mise en lumière directe implique une perturbation du cycle de vie des plantes (germination, croissance, floraison...). L'activité peut aussi être déséquilibrée par la prolongation de l'activité photosynthétique par la lumière artificielle au-delà des heures du soleil.

La pollution lumineuse a aussi un effet indirect sur la flore en perturbant la pollinisation (pollinisateurs nocturnes mais aussi diurnes.).

Les insectes :

La pollution lumineuse a un impact extrêmement fort sur les invertébrés et notamment les espèces volantes. Un maillon très important de la chaîne alimentaire d'un écosystème qui est très impacté par les flux directs et les halos lumineux très intenses. Et ce sont notamment les lumières émettant dans des gammes d'ultra-violet et courtes longueur d'onde (bleu) qui ont le plus d'impacts. La réaction principale chez les invertébrés est une phototaxie positive marquée, c'est-à-dire que les espèces sont principalement attirées par la lumière.

La pollution lumineuse a pour effet :

- Désorientation et fatigue
 - Les invertébrés nocturnes sont directement attirés par les flux lumineux, un lampadaire pouvant être perturbant jusqu'à 200 mètres.

- Pièges et mortalités
 - L'attraction réflexe vers la lumière piège les espèces sous les flux lumineux. Un véritable piège dont il est difficile de se sortir (voir impossible) tant que l'appareil est en fonction. Les espèces se retrouvent piégées dans les vasques des lampadaires (qui protègent l'ampoule) et peuvent se griller sur les ampoules trop chaudes (ou se faire percuter par un véhicule).
- Barrières écologiques
 - En considérant cela et qu'en moyenne les lampadaires sont espacés de 30 à 50 mètres, une rue éclairée devient une barrière infranchissable
- Surmortalité par prédation
 - L'attraction et le piégeage des insectes sous les flux lumineux entraînent une modification des liens proies/prédateurs et une surmortalité des insectes (chauve-souris, araignées...)
- Succès reproducteurs
 - Influence des succès reproducteurs des invertébrés en présence de flux directs

Les amphibiens

La pollution lumineuse affecte sensiblement les amphibiens, notamment dans leurs activités crépusculaires .

- Succès reproducteurs
 - Certaines espèces montrent une baisse de l'activité de reproduction en cas d'éclairage des zones

- Modification des comportements
 - Les amphibiens et plus précisément les grenouilles et crapauds mâles ont tendance à réduire l'intensité des chants voir de les stopper en cas d'éclairage direct. La reproduction est aussi en baisse.
- Barrières écologiques
 - Les migrations des espèces d'amphibiens se fait essentiellement la nuit, en présence d'éclairage les déplacements sont perturbés
- Activités d'alimentation
 - Certaines espèces de grenouilles chassent avec une intensité lumineuse forte, d'autres faible. La mise en lumière provoque un dérèglement des compétitions interspécifiques
- Perturbation des développements
 - En présence de lumière, les espèces montrent des perturbations dans leur développement et leurs activités comme les salamandres terrestres

Les amphibiens peuvent être sensibles à 0,1 lux.

Reptiles

Les effets de la pollution lumineuse sur les reptiles restent peu renseignés. On notera que certaines espèces nocturnes peuvent profiter de l'éclairage pour chasser les espèces qui sont attirées (piégées) sous les lampadaires. Ce qui peut entraîner une perturbation globale des chaînes trophiques, induisant une prolifération des prédateurs et une baisse du nombre des proies.

On notera des études mentionnant des impacts sur quelques espèces ciblées comme des couleuvres (de Montpellier ou verte et jaune) ou encore le lézards (ocellé, des souches). A noter que ces espèces ne sont pas présentes sur le territoire d'étude.

- Les réponses connues pour les reptiles (hors tortues) :
- Fonction biologique :
 - La lumière peut être dérangement pour les phases d'hibernage, impliquant que les espèces s'éloignent des zones éclairées.
- Barrières écologiques :
 - La lumière est soupçonnée d'être un élément fragmentant des migrations journalières qui peuvent avoir lieu au crépuscule.

Avifaune

Les oiseaux sont ceux qui font l'objet du plus grand nombre d'études sur le sujet des impacts de la pollution lumineuse. Les oiseaux sont particulièrement sensibles aux effets de la pollution lumineuse lors de la reproduction et de la migration :

- Perturbation nidification :
 - En période de nidification, les oiseaux et les juvéniles peuvent être attirés par les sources lumineuses. Désorientation et impossibilité de rejoindre les nids. Nidification forcée loin des espaces éclairés par des flux directs.
- Barrières écologiques :
 - La lumière artificielle représente un enjeu dans la cohérence des déplacements locaux et journaliers pour les oiseaux
- **Déplacements migratoires** : une part importante des migrations se fait de nuit, les oiseaux se repèrent grâce à la lumière des étoiles et de la lune. La présence de halos lumineux implique une désorientation, surconsommation d'énergie vitale et perte de temps sur les périodes de migration :
 - Forte mortalité, fatigue, baisse de la reproduction.

- Confinement dans des espaces sans lumières :
 - Les oiseaux nocturnes, notamment les rapaces, sont particulièrement sensibles à la lumière et vont fuir les zones les plus éclairées. Tous les oiseaux diurnes sont touchés par la pollution lumineuse, notamment par le fait que leur période de repos est réduite (entraînant fatigue, stress et dérèglement de leur horloge biologique).

Mammifères (hors chiroptères)

Beaucoup d'espèces de mammifères terrestres manifestent une répulsion vis-à-vis de la lumière (phototactisme positif), les espaces éclairés par des flux directs et en cas de sur-illumination (halos lumineux), les mammifères ont tendance à fuir et se réfugier dans des espaces obscurs de plus en plus restreints et de plus en plus rares.

Les effets de la pollution lumineuse ont pour conséquence :

- Barrière écologique :
 - La lumière agit comme barrière écologique et limite la cohérence des écosystèmes (suppression des corridors écologiques), les espèces ne peuvent plus se déplacer et migrer.
- Baisse de l'activité de nutrition :
 - Les mammifères (petits et micromammifères notamment) montrent une activité particulièrement réduite sous les flux lumineux proches et dans des zones avec des halos lumineux intenses.
- Confinement dans des espaces sans lumières :
 - La fuite de la lumière entraîne un confinement des espèces dans des espaces de plus en plus restreints entraînant surpopulation (et soupçonner même des problèmes génétiques).

■ Sur-prédation :

- En présence de lumière de nombreuses espèces se trouvent exposées à la prédation, ainsi que le confinement pousse les espèces opportunistes à ne chasser qu'en présence de lumière (exemple des phoques veaux-marins agglutinés sous les plages éclairées pour attraper les saumons juvéniles attirés par la lumière).

Chiroptères

Concernant les chiroptères (chauves-souris), celles-ci sont particulièrement affectées par la pollution lumineuse. Ce sont principalement des espèces à phototaxie négative (fuite de la lumière) et sont particulièrement sensibles aux flux directs ainsi qu'au halo lumineux. On considère que le halo lumineux doit être supérieur à 21 mag/arcsec² (donc une obscurité relativement importante) pour que les individus s'épanouissent dans les meilleures conditions. Dans le cas de la zone d'étude, la radiance se situe autour de 20 mag/arcsec² à l'état initial et 19,9 mag/arcsec² à l'état projeté.

On notera que certaines espèces, comme la pipistrelle, sont beaucoup plus adaptées à la lumière et semblent au contraire profiter des flux lumineux pour se nourrir.

La pollution lumineuse a pour effet :

■ Impact sur les habitats et espaces de vie :

- Potentielle destruction de colonies et modification de la physionomie des juvéniles (plus petits lorsqu'ils occupent des bâtiments éclairés et retard de croissance).

■ Barrières écologiques :

- Fragmentation des paysages nocturnes et forte perturbation dans les déplacements.

■ Effet sur la prédation :

- Interférence sur la distribution des proies et sur les compétitions inter-, intra- spécifique. Notamment, la pipistrelle est connue pour s'être adaptée à l'éclairage et au contraire les grands rhinolophes ne chassent que dans l'obscurité totale (espaces qui deviennent de plus en plus rare)

Synthèse des enjeux de la pollution lumineuse sur les taxons

Taxons	Synthèse des impacts	Enjeux de pollution lumineuse (réponse des espèces)
Flore	<ul style="list-style-type: none"> • Perturbation des cycles végétatifs • Perturbation indirecte sur la pollinisation 	Faibles
Invertébrés	<ul style="list-style-type: none"> • Désorientation/fatigue • Piège et mortalité • Barrière écologique • Surmortalité et prédation • Succès reproducteur 	Très Forts (invertébrés nocturnes)
Amphibiens	<ul style="list-style-type: none"> • Succès reproducteur • Modification des comportements • Barrières écologiques • Activités d'alimentation • Perturbation des développements 	Forts
Reptiles (hors tortues)	<ul style="list-style-type: none"> • Fonction biologique • Barrières écologiques 	Faibles (hors tortues)
Oiseaux	<ul style="list-style-type: none"> • Perturbation nidification • Barrières écologiques • Déplacements migratoires • Confinement dans des espaces sans lumières (oiseaux nocturnes) 	Forts
Mammifères (hors chiroptères)	<ul style="list-style-type: none"> • Barrière écologique • Baisse de l'activité de nutrition : • Confinement dans des espaces sans lumières • Sur prédation 	Modérés
Chiroptères	<ul style="list-style-type: none"> • Impact sur les habitats et espaces de vie • Barrières écologiques • Effet sur la prédation 	Très Forts

Les enjeux locaux de la biodiversité

- L'analyse s'appuie sur le rapport final réalisée par Biotope « Diagnostic écologique 14 février 2023, opération et construction d'un centre pénitentiaire »

Principes

L'étude de la pollution lumineuse s'appuie sur les études terrains d'inventaire écologique fournie dans le cadre des analyses des enjeux et des impacts.

L'APIJ a fait appel à Biotope afin de réaliser un diagnostic faune-flore-zones humides complet de ce site pour avoir une base de travail robuste dans le cadre de la poursuite éventuelle des démarches réglementaires encadrant le projet d'implantation de l'établissement pénitentiaire.

Ainsi, l'analyse s'appuie sur le diagnostic écologique datant du 14 février 2023. Les inventaires ont été menés sur l'aire d'étude à cheval sur les communes de Trélazé et de Loire-Authion. La zone définie par le producteur de l'étude intègre la zone d'implantation des variantes du projet. L'état initial des milieux naturels a été mené sur

- L'inventaire des espèces animales et végétales ;
- Une cartographie des habitats ;
- Une analyse des fonctionnalités écologiques à l'échelle locale ;
- Une identification des enjeux écologiques et des implications réglementaires

Les expertises de terrain se sont déroulées sur un cycle biologique complet pour l'ensemble des groupes. La pression de prospection a permis de couvrir l'ensemble de l'aire d'étude préciser laquelle à différentes dates, dans des conditions d'observations toujours suffisantes. L'état initial apparaît donc robuste et représentatif de la diversité écologique des milieux naturels locaux et de leur richesse spécifique.

La définition des enjeux de l'étude la pollution lumineuse

Pour définir les enjeux de pollution lumineuse à l'état initial, la méthode consiste à mettre en perspective les principaux enjeux de l'étude écologique fournie par rapport **aux conditions nocturnes actuelles** et **aux réponses générales de la biodiversité face à la lumière** (voir Synthèse des enjeux de la pollution lumineuse sur les taxons page 36).

Niveau d'enjeu pollution lumineuse

	Très faible/nul	Faible	Modéré	Fort	Très fort
Négligeable/nul					
Faible					
Moyen					
Fort					
Très fort/majeur					

Niveau d'enjeu étude écologique fournie

Echelle retenue :

Très fort
Fort
Modéré
Faible
Très faible
Nul

Evaluation des enjeux : flore

Flore

Rapport d'inventaire écologique :

Les inventaires révèlent que le site présente de nombreuses espèces floristiques. La richesse est importante compte tenu du secteur agricole. Une espèce est identifiée avec un enjeu contextualisé moyen. Plusieurs espèces exotiques envahissantes sont présentes.

Une espèce protégée a été observée (Peucedan de France). Deux espèces patrimoniales ont été observées (Œillet des chartreux et la Nielle des blés). 9 espèces exotiques envahissantes sont observées.

Enjeu de l'étude écologique négligeable.

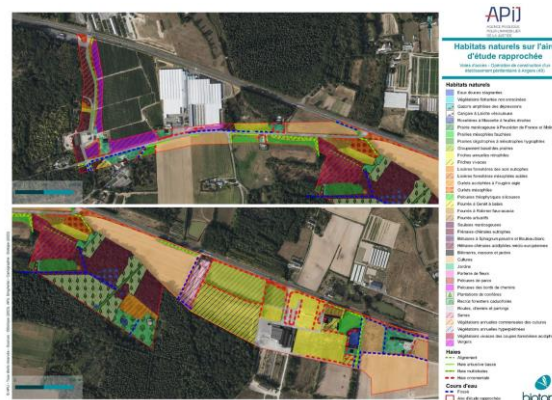
Mise en perspective de la pollution lumineuse (voir Synthèse des enjeux de la pollution lumineuse sur les taxons page 36):

Comme vu dans l'approche générale des enjeux de lumière, la pollution lumineuse reste peu impactante au regard des connaissances actuelles. Les effets sont plutôt indirects sur les pollinisateurs.

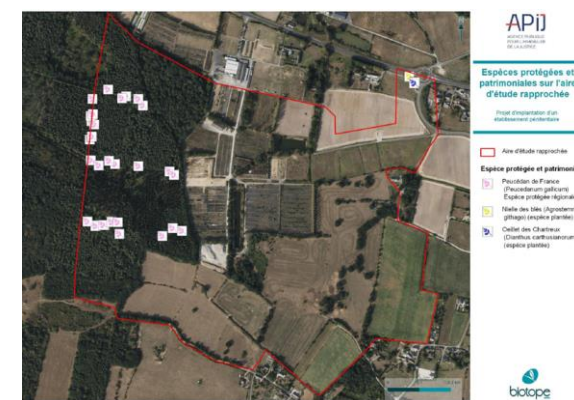
Enjeu de pollution lumineuse faible.

- **Enjeu retenu sur une mise en lumière : Très faible.**

Cartographie de l'étude écologique :



Enjeux zone « accès »



Enjeux zone « enceinte »

Niveau d'enjeu pollution lumineuse

	Très faible/nul	Faible	Modéré	Fort	Très fort
Négligeable/nul		●			
Faible					
Moyen					
Fort					
Très fort/majeur					

Niveau d'enjeu étude écologique fournie

Très fort
Fort
Modéré
Faible
Très faible
Nul

Insectes

Rapport d'inventaire écologique :

La richesse entomologique est importante compte tenu du contexte bocager de l'aire d'étude rapprochée. En effet, elle est liée à la grande diversité d'habitats favorables à la reproduction des odonates (mares, étangs, prairies inondables) et aux papillons (prairies et pelouses de fauche).

45 espèces d'insectes (27 lépidoptères, 2 orthoptères, 11 odonates et 5 coléoptères) sont présentes dans l'aire d'étude rapprochée, parmi lesquelles 4 sont remarquables : le Grand Capricorne, le Lucane cerf-volant, l'Aesche printanière, et la Noctuelle des Peucedans. Parmi ces espèces, deux sont protégées : le Grand Capricorne et la Noctuelle des Peucedans.

Les principaux secteurs à enjeux au sein de l'aire d'étude rapprochée concernent les alignements de vieux chênes et les vieux chênes isolés, le boisement de feuillus et les allées forestières présentant du Peucedan de France *Peucedanum gallicum*.

Enjeu de l'étude écologique : faible à fort

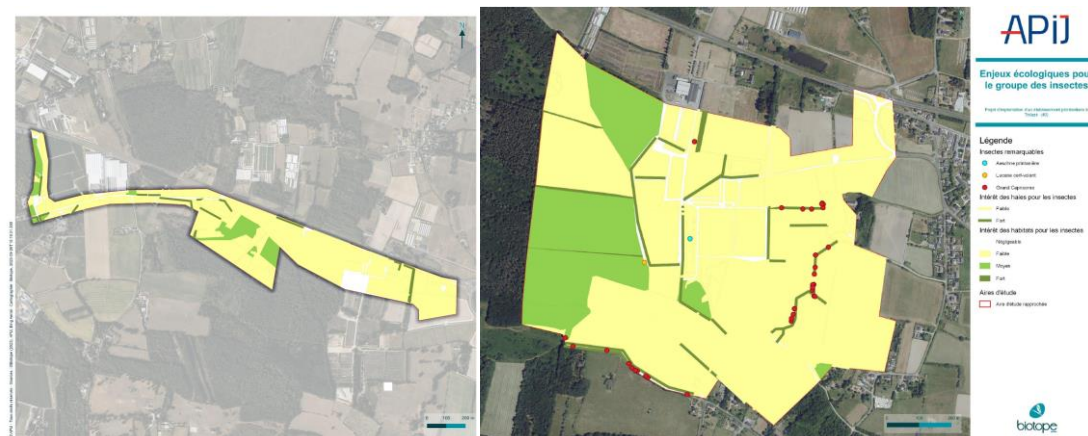
Mise en perspective de la pollution lumineuse :

La lumière artificielle a des impacts particulièrement forts sur les insectes et représente un enjeu important dans le cadre de mises en lumière pour les espèces présentes mais aussi les espèces qui peuvent être éloignées et qui pourront être attirées à plusieurs dizaines de mètres. A noter qu'aucun inventaire nocturne n'a été mené.

Enjeu de pollution lumineuse : très fort

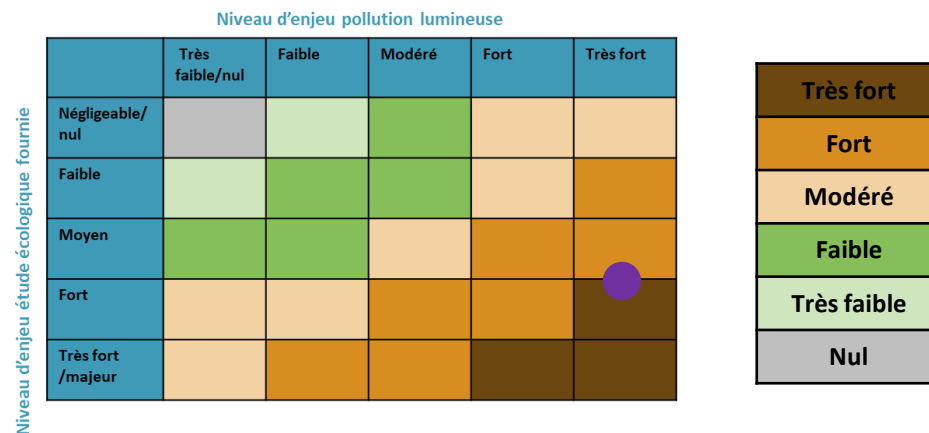
- **Enjeu retenu sur une mise en lumière : fort à très fort.**

Cartographie de l'étude écologique :



Enjeux zone « accès »

Enjeux zone « enceinte »



Amphibiens

Rapport d'inventaire écologique :

La richesse batrachologique est moyenne compte tenu du contexte bocager de l'aire d'étude rapprochée. En effet, elle est liée à la grande diversité d'habitats favorables à la reproduction des amphibiens (mares, étangs, prairies inondables) et à la disponibilité de zones d'hivernage (vieux boisements de feuillus, haies...).

6 espèces d'amphibiens sont présentes dans l'aire d'étude rapprochée, parmi lesquelles 5 sont remarquables. Les principaux secteurs à enjeux au sein de l'aire d'étude rapprochée concernent les bassins, les fossés et les mares forestières pour la période de reproduction, et les boisements et remblais pour la phase terrestre de la plupart des espèces observées.

Parmi ces espèces, 5 sont protégées : Alyte accoucheur, Crapaud épineux, Triton palmé, Pélodyte ponctué, Grenouille agile.

Enjeu de l'étude écologique : faible à moyen

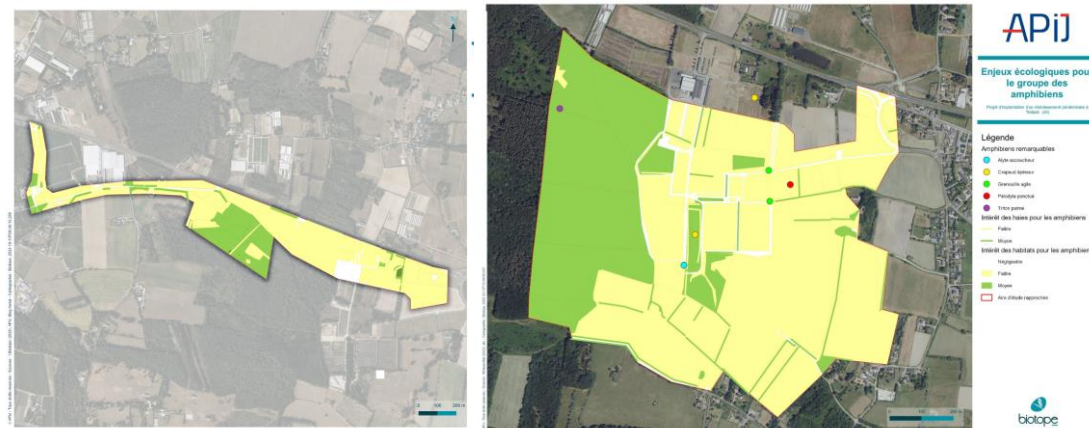
Mise en perspective de la pollution lumineuse :

La lumière directe des espaces peut engendrer des dégâts importants sur les amphibiens, et notamment sur la reproduction des espèces. Les grenouilles et les tritons peuvent être attirés par la lumière¹ (même si le triton palmé ne fait pas l'objet d'étude aujourd'hui). Les têtards peuvent être sensibles à des niveaux de luminosité très faibles.

Enjeu de pollution lumineuse : Fort

- **Enjeu retenu sur une mise en lumière : modéré à fort**

Cartographie de l'étude écologique :



Enjeux zone « accès »

Enjeux zone « enceinte »

Niveau d'enjeu pollution lumineuse

	Très faible/nul	Faible	Modéré	Fort	Très fort
Négligeable/nul					
Faible					
Moyen					
Fort					
Très fort/majeur					

Très fort
Fort
Modéré
Faible
Très faible
Nul

Niveau d'enjeu étude écologique fournie

1. Muntz 1963

Evaluation des enjeux : reptiles

Reptiles

Rapport d'inventaire écologique :

La richesse herpétologique est faible malgré le contexte bocager de l'aire d'étude rapprochée.

4 espèces de reptiles sont présentes dans l'aire d'étude rapprochée, les 4 sont remarquables. Les principaux secteurs à enjeux au sein de l'aire d'étude rapprochée concernent les friches, les ronciers et les remblais.

Toutes ces espèces sont protégées : Couleuvre helvétique, Lézard des murailles, Couleuvre verte et jaune et Orvet fragile.

Enjeu de l'étude écologique : faible à moyen

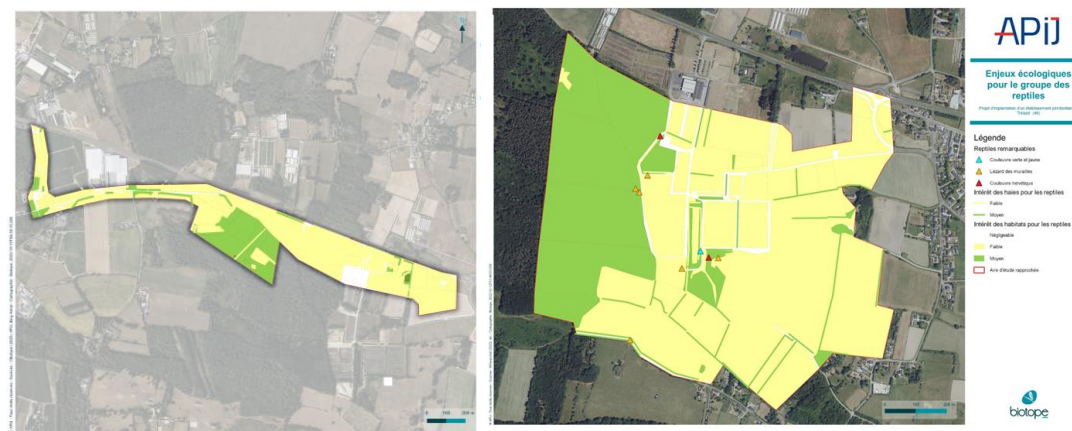
Mise en perspective de la pollution lumineuse :

La pollution lumineuse présente peu d'enjeu sur les espèces de reptiles. Les espèces présentes sont essentiellement diurnes, les incidences vont concerner une modification de l'horloge biologique de ces espèces.

Enjeu de pollution lumineuse : très faible

- Enjeu retenu sur une mise en lumière : faible à moyen

Cartographie de l'étude écologique :



Enjeux zone « accès »

Enjeux zone « enceinte »

Niveau d'enjeu pollution lumineuse

	Très faible/nul	Faible	Modéré	Fort	Très fort
Négligeable/nul					
Faible					
Moyen	●				
Fort					
Très fort/majeur					

Très fort
Fort
Modéré
Faible
Très faible
Nul

Niveau d'enjeu étude écologique fournie

1. Muntz 1963

Avifaune

Rapport d'inventaire écologique :

La richesse avifaunistique est moyenne compte tenu du contexte bocager de l'aire d'étude rapprochée. En effet, elle est liée à la grande diversité d'habitats favorables à la reproduction des oiseaux (prairies, bocages, boisements, cultures, étangs, ...).

3 espèces présentes un enjeu contextualisé fort.

Des rapaces nocturnes, notamment la chevêche d'Athéna est potentiellement présente. Ainsi que plusieurs espèces migratrices.

Enjeu de l'étude écologique : moyen à fort

Mise en perspective de la pollution lumineuse :

La mise en lumière pourra avoir des effets sur les nichages des oiseaux (diurne comme nocturne), limitant/reculant la présence de nid au-delà des zones recevant directement des flux lumineux.

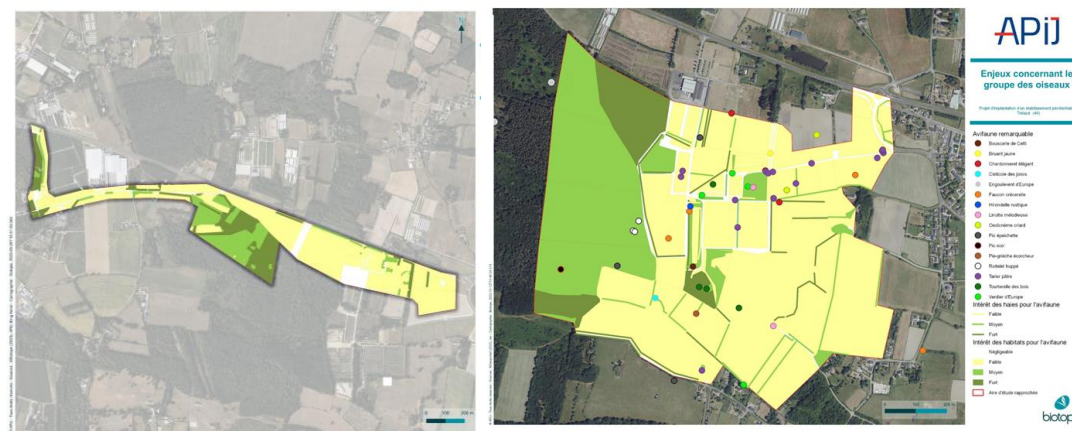
Les rapaces nocturnes peuvent être très sensibles à la lumière directe, en perdant des repères dans la chasse.

Enfin, la question de la lumière peut aussi perturber les migrations, notamment le halo lumineux qui attire les oiseaux et les perturbent.

Enjeu de pollution lumineuse : fort

- **Enjeu retenu sur une mise en lumière : fort.**

Cartographie de l'étude écologique :



Enjeux zone « accès »

Enjeux zone « enceinte »

Niveau d'enjeu pollution lumineuse

	Très faible/nul	Faible	Modéré	Fort	Très fort
Négligeable/nul					
Faible					
Moyen					
Fort				●	
Très fort/majeur					

Très fort
Fort
Modéré
Faible
Très faible
Nul

1. Muntz 1963

Evaluation des enjeux : mammifères (hors chiroptères)

Mammifères (hors chiroptères)

Rapport d'inventaire écologique :

La richesse mammalogique est moyenne compte tenu du contexte bocager de l'aire d'étude rapprochée. En effet, elle est liée à la grande diversité d'habitats favorables à ce groupe.

10 espèces de mammifères sont présentes dans l'aire d'étude rapprochée, parmi lesquelles 2 sont remarquables. Les principaux secteurs à enjeux au sein de l'aire d'étude rapprochée concernent les massifs forestiers où se trouvent l'Ecureuil roux.

Parmi ces espèces, une est protégée, il s'agit de l'Ecureuil roux.

Enjeu de l'étude écologique : faible à moyen

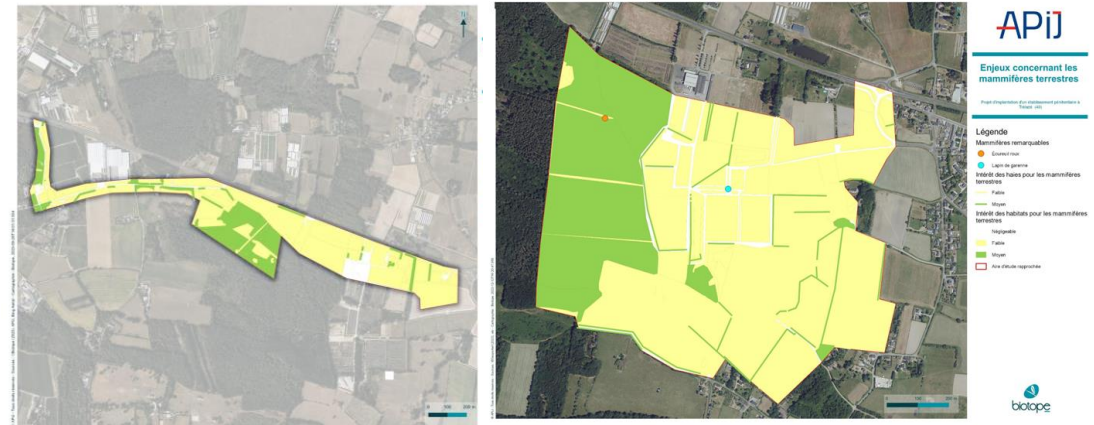
Mise en perspective de la pollution lumineuse :

La mise en lumière peut être gênante pour les espèces qui vivent en partie la nuit. L'écureuil roux, est lucifuge et devrait s'éloigner des espaces avec de la lumière directe.

Enjeu de pollution lumineuse : modéré

- **Enjeu retenu sur une mise en lumière : faible à modéré.**

Cartographie de l'étude écologique :



Enjeux zone « accès »

Enjeux zone « enceinte »

Niveau d'enjeu pollution lumineuse

	Très faible/nul	Faible	Modéré	Fort	Très fort
Négligeable/nul	Très faible/nul	Faible	Modéré	Fort	Très fort
Faible	Faible	Modéré	Fort	Très fort	Très fort
Moyen	Modéré	Fort	Très fort	Très fort	Très fort
Fort	Fort	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort
Très fort/majeur	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort

Niveau d'enjeu étude écologique fournie

Très fort
Fort
Modéré
Faible
Très faible
Nul

Chiroptères

Rapport d'inventaire écologique :

La richesse chiroptérologique est importante compte tenu du contexte bocager et boisé de l'aire d'étude rapprochée. En effet, elle est liée à la grande diversité d'habitats favorables aux déplacements et à l'alimentation des chauves-souris.

17 espèces de chiroptères sont présentes dans l'aire d'étude rapprochée, toutes sont remarquables. Tous les linéaires arborés servent de corridor de transit pour les plus petites espèces. 3 espèces identifiées ont un enjeu contextualisé de Fort : la pipistrelle commune, la noctule commune et la noctule de leister.

Enjeu de l'étude écologique : faible à fort

Mise en perspective de la pollution lumineuse :

Plusieurs milieux semblent favorables au groupe des chiroptères, notamment avec la présence de haies bocagères, des milieux ouverts qui représentent des zones d'alimentation et de déplacements et des arbres pouvant constituer des gîtes potentiels. Les pourtours du projet présentent peu de points lumineux.

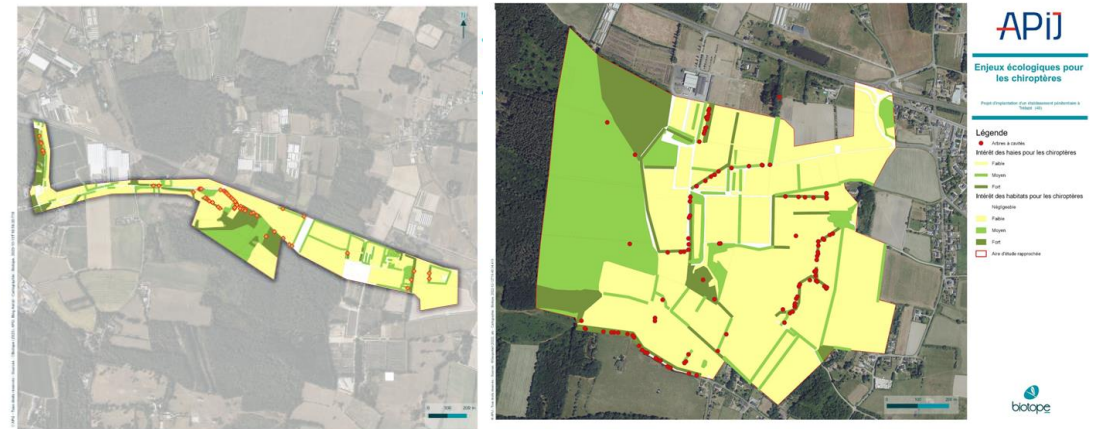
Les pipistrelles semblent plus adaptées à la lumière et chassent sous les lampadaires, néanmoins, elles sont moins présentes en milieu éclairés. D'autres espèces, comme les rhinolophes, sont lucifuges, et particulièrement sensibles à la pollution lumineuse.

La mise en lumière pourra fortement perturber ces espèces.

Enjeu de pollution lumineuse : très fort

- **Enjeu retenu sur une mise en lumière : fort à très fort.**

Cartographie de l'étude écologique :



Enjeux zone « accès »

Enjeux zone « enceinte »

Niveau d'enjeu pollution lumineuse

	Très faible/nul	Faible	Modéré	Fort	Très fort
Négligeable/nul					
Faible					
Moyen					
Fort					
Très fort/majeur					

Niveau d'enjeu étude écologique fournie

Très fort
Fort
Modéré
Faible
Très faible
Nul

Synthèse des enjeux de la pollution lumineuse au regard de la biodiversité locale

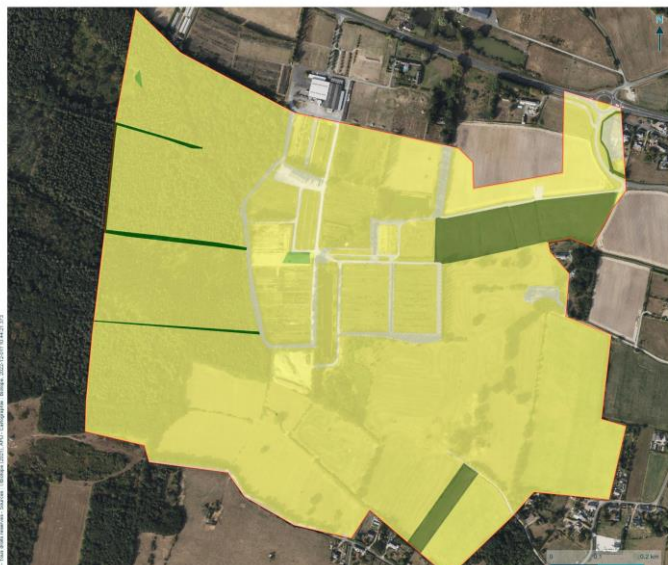
Taxons	Synthèse des éléments	Enjeux de pollution lumineuse retenus	
Flore	<ul style="list-style-type: none"> • Richesse importante • Espèces avec préoccupations mineures 	Très faible	Très fort
Invertébrés	<ul style="list-style-type: none"> • Richesse entomologique • Habitats favorables • Forts enjeux de mise en lumière 	Fort à très fort	Fort
Amphibiens	<ul style="list-style-type: none"> • Habitats favorables • Plusieurs espèces remarquables présentes • Forte sensibilité à la lumière 	Modéré à fort	Modéré
Reptiles	<ul style="list-style-type: none"> • Richesse écologique faible • Quelques habitats favorables • Espèces peu concernées par la mise en lumière 	Faible à moyen	Faible
Oiseaux	<ul style="list-style-type: none"> • Richesse moyenne • Des espèces avec un enjeu fort et des espèces sensibles à la pollution lumineuse (rapaces nocturnes) • Forte sensibilité à la lumière (rapace et espèces migratrices) 	Fort	Très faible
Mammifères (hors chiroptères)	<ul style="list-style-type: none"> • Richesse moyenne • 2 espèces remarquables • Des enjeux modérés de mise en lumière 	Faible à modéré	Nul
Chiroptères	<ul style="list-style-type: none"> • Richesse importante • 3 espèces à enjeux • Une forte sensibilité à la lumière 	Fort à très fort	

Les principaux enjeux s'orientent sur les **insectes, les chiroptères puis les oiseaux**. Ce sont d'une part des espèces très sensibles à la pollution lumineuse et les espèces présentes peuvent y être sensibles. On notera aussi la question des **amphibiens**, qui présentent des enjeux aussi importants.

Les enjeux locaux des habitats et cohérence des écosystèmes

Enjeux sur les habitats

Enjeux zone « enceinte »



APIJ
AGENCE PUBLIQUE
POUR L'AMBIENT
DE LA JUSTICE

Enjeux des habitats naturels sur l'aire d'étude rapprochée
Projet d'implantation d'un établissement pénitentiaire

Enjeux

- Négligeable
- Faible
- Moyen
- Fort
- Très fort
- Aire d'étude rapprochée

Enjeux zone « accès »



APIJ
AGENCE PUBLIQUE
POUR L'AMBIENT
DE LA JUSTICE

Enjeux des habitats naturels sur l'aire d'étude rapprochée
Voies d'accès - Opération de construction d'un établissement pénitentiaire près de Angers (49)

Légende

Enjeu concernant les habitats naturels

- Fort
- Moyen
- Faible
- Négligeable

Cours d'eau

- Fossé

Haies

- Alignement
- Haie arbustive basse
- Haie multistrates
- Haie ornementale

□ Aire d'étude rapprochée



Concernant les habitats sur le périmètre du projet, l'étude écologique mentionne que l'aire d'étude rapprochée est située sur une ancienne zone maraichère. Elle est constituée de friches, prairies pâturées et de plantations de conifères.

Au total, 30 habitats naturels ont été recensés sur l'aire d'étude rapprochée. 4 sont d'intérêt communautaire : l'Aulnaie/frênaie alluviale, la Prairie mésophile fauchée, la Prairie marécageuse à Peucedan de France et Molinie bleue et la Mégaphorbiaie alluviale eutrophe .

La synthèse des enjeux montre des niveaux pouvant atteindre une classification très forte.

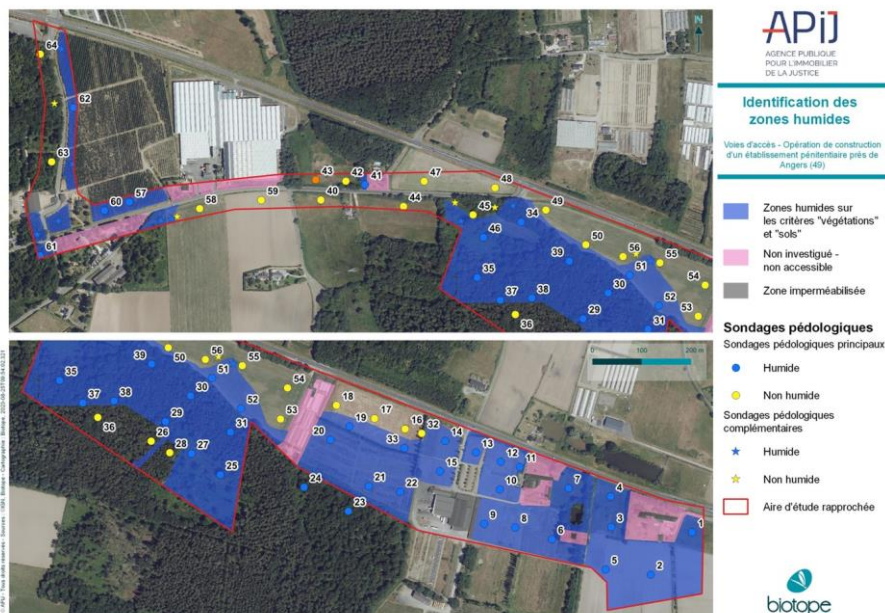
Ces enjeux seront comparés aux résultats attendus de la modélisation de l'éclairage du projet.

Enjeux sur les zones humides

Enjeux zone « enceinte »



Enjeux zone « accès »



Concernant les zones humides, il est important de noter que les surfaces en eau ne peuvent être éclairées au regard des dispositions de l'arrêté du 27 décembre 2018, concernant la réduction des nuisances lumineuses.

Le territoire d'étude comporte 58,18 ha en zone « enceinte » et 23,3 ha en zone « accès » de zones humides. On notera la présence de plusieurs zones en eaux temporaires ou permanentes. Au sein de l'aire d'étude rapprochée, le réseau hydrographique est composé de deux plans d'eau, de quelques mares et d'un grand nombre de fossés.

Au regard de la pollution lumineuse, les zones humides peuvent être pertinentes lorsqu'elles sont en surface et accueillent des espèces associées qui sont parfois très sensibles à la lumière, comme les amphibiens et les insectes notamment. Les zones humides qui ne sont pas en surface présentent moins d'intérêt par rapport aux enjeux de lumière.

Etude d'impacts sur la cohérence écologique

L'analyse des cohérences écologiques s'appuie sur le concept de trame verte et bleue, à laquelle s'ajoute la notion de lumière et d'obscurité conceptualisée sous le terme de trame noire.

La Trame Verte et Bleue (TVB) est un outil d'aménagement issu du Grenelle de l'environnement. Il vise à augmenter la part des milieux naturels et semi-naturels dans la répartition des modes d'occupation du territoire, à améliorer leur qualité écologique et leur diversité, et à augmenter leur connectivité pour permettre la circulation des espèces qu'ils hébergent, nécessaire à leur cycle de vie.

La TVB permet de définir :

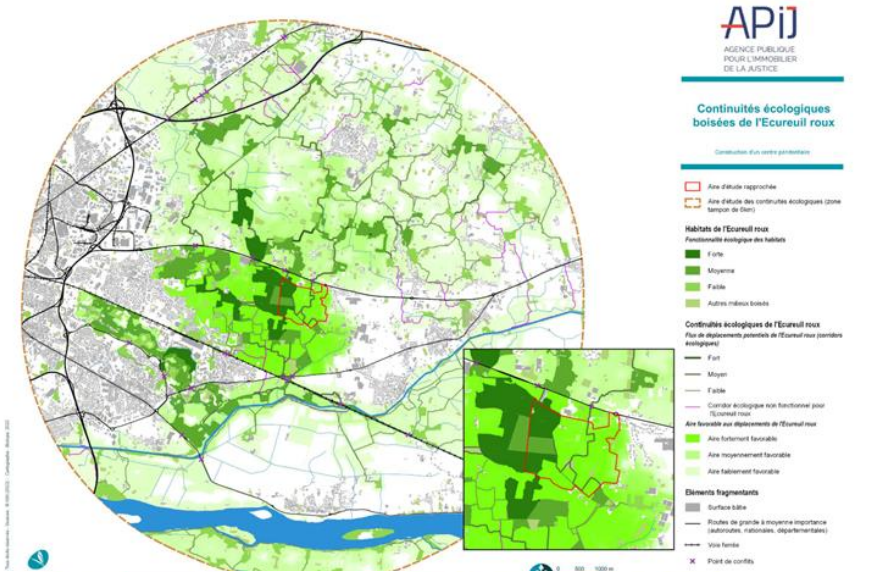
- Les continuités écologiques, c'est-à-dire des espaces au sein desquels peuvent se déplacer un certain nombre d'espèces. Il s'agit d'un ensemble de milieux plus ou moins favorables à ces espèces, comprenant à la fois les habitats indispensables à la réalisation de leur cycle de vie (alimentation, reproduction, repos, etc.) et des espaces intermédiaires, moins attractifs, mais accessibles et ne présentant pas d'obstacle infranchissable. Les continuités écologiques sont définies comme l'association de réservoirs de biodiversité et de corridors écologiques.
- Les réservoirs de biodiversité sont des espaces caractérisés par une biodiversité remarquable par rapport au reste du territoire. Ils remplissent une grande partie des besoins des espèces considérées et constituent leurs milieux de vie principaux. Ils jouent un rôle crucial dans la dynamique des populations de faune et de flore :

- Ces espaces permettent le développement et le maintien des populations présentes, ils « fournissent » des individus susceptibles de migrer vers l'extérieur et de coloniser d'autres sites favorables, et peuvent servir de refuge pour des populations forcées de quitter un milieu dégradé ou détruit.
 - La pérennité des populations est fortement dépendante de leur effectif (elle-même limitée entre autres par la taille des réservoirs) et des échanges génétiques entre réservoirs. Pour toutes ces raisons, les réservoirs de biodiversité doivent fonctionner sous la forme d'un réseau, entre lesquels des individus peuvent se déplacer.
- Les corridors écologiques sont des espaces reliant les réservoirs, plus favorables au déplacement des espèces que la matrice environnante. Les milieux qui les composent ne sont pas nécessairement homogènes, continus, ni activement recherchés par les espèces qui les traversent. La qualité principale qui détermine leur rôle de corridor, pour une espèce donnée, est la capacité des individus à les traverser pour relier deux réservoirs, avec un effort de déplacement minimal et une chance de survie maximale. On parle de perméabilité des espaces, ou au contraire de résistance, pour décrire la facilité avec laquelle ils sont parcourus.

La trame noire : intimement liée à la trame verte et bleue, la trame noire est aussi un enjeu majeur dans les continuités écologiques. Ce concept vise à intégrer **la lumière comme élément fragmentant la cohérence** des écosystèmes. Le phénomène se traduit par le fait que la lumière artificielle va devenir un obstacle aux différentes migrations des espèces au cours de la nuit coupant les corridors écologiques. Que ce soit par phototaxie positive ou négative, les concentrations lumineuses vont devenir infranchissables, limitant drastiquement les migrations (journalières, saisonnières). L'ensemble du monde animalier, diurne comme nocturne, est impacté. La lumière artificielle va ainsi mettre une limite importante dans la cohérence des écosystèmes.

Enjeux de cohérence écologique : vers une trame noire

Enjeux zone « encinte »



Enjeux zone « accès »



En terme de cohérence écologique, le territoire se montre intéressant.

L'inventaire faune-flore mentionne des zones pertinentes pour la trame verte et bleue.

Une simulation a été menée pour une espèce cible : « De manière générale, la quasi-totalité de l'aire d'étude rapprochée est fortement favorable aux déplacements de l'espèce cible, ce qui est un bon indicateur de la fonctionnalité écologique du site pour les espèces inféodées aux milieux boisés et arborés. La dégradation voire la disparition des corridors au niveau de l'aire d'étude rapprochée pourrait venir fragiliser les continuités écologiques nord-sud et renforcer l'isolement de l'ensemble des boisements situés entre la voie ferrée et la D347. »

En considérant la lumière comme une barrière physique au déplacement, le territoire d'étude reste particulièrement épargné, notamment dans un axe nord/sud.

L'enjeu est donc fort pour la cohérence écologique.

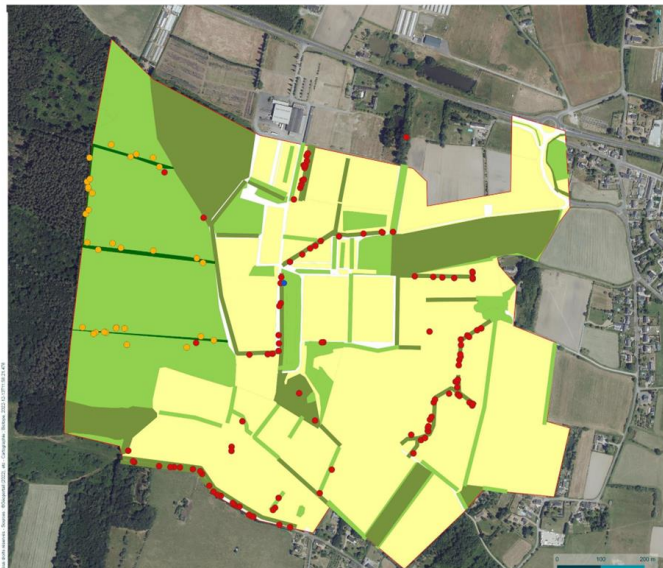
Synthèse des enjeux de la pollution lumineuse au regard de la biodiversité locale

Taxons	Synthèse des éléments	Enjeux de pollution lumineuse retenus (croisement avec les espèces identifiées)
Habitats	<ul style="list-style-type: none"> Des habitats pouvant avoir des enjeux très forts Des haies pertinentes pour les déplacements 	Fort
Zones humides	<ul style="list-style-type: none"> Recensement de nombreuses zones humides, avec quelques espaces en eaux de surface ponctuels 	Modéré
Trame noire	<ul style="list-style-type: none"> La forêt à l'ouest du projet est un réservoir de biodiversité pertinent Des éléments fragmentants proches Une matrice de corridors écologiques particulièrement favorables 	Fort

Très fort
Fort
Modéré
Faible
Très faible
Nul

Carte de synthèse des enjeux écologiques

Enjeux zone « encinte »



APIJ

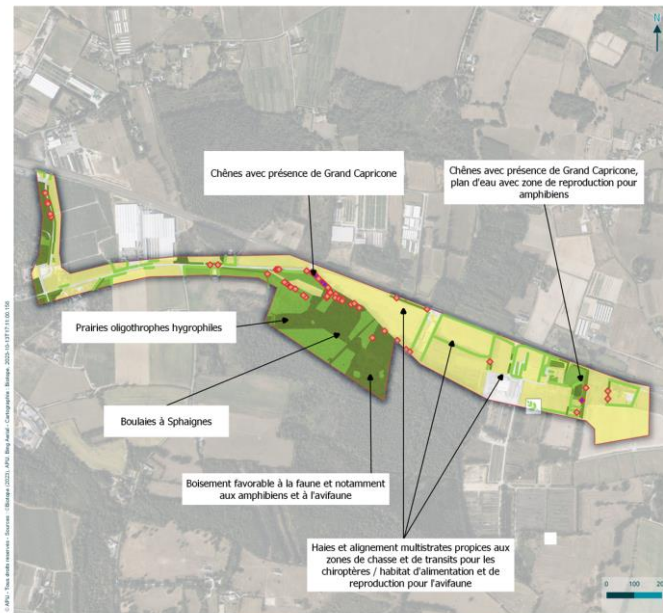
Synthèse des enjeux écologiques

Projet d'implantation d'un établissement pénitentiaire à (49000 - 49)

- Légende**
- Nas circulaire routique dans un cabanon
 - Arbres à cavités
 - Flore protégée
 - Peucedan de France
 - Niveaux d'enjeux écologiques
 - Négligeable
 - Faible
 - Moyen
 - Fort
 - Très fort
 - Aire d'étude rapprochée



Enjeux zone « accès »



APIJ

Synthèse des enjeux écologique

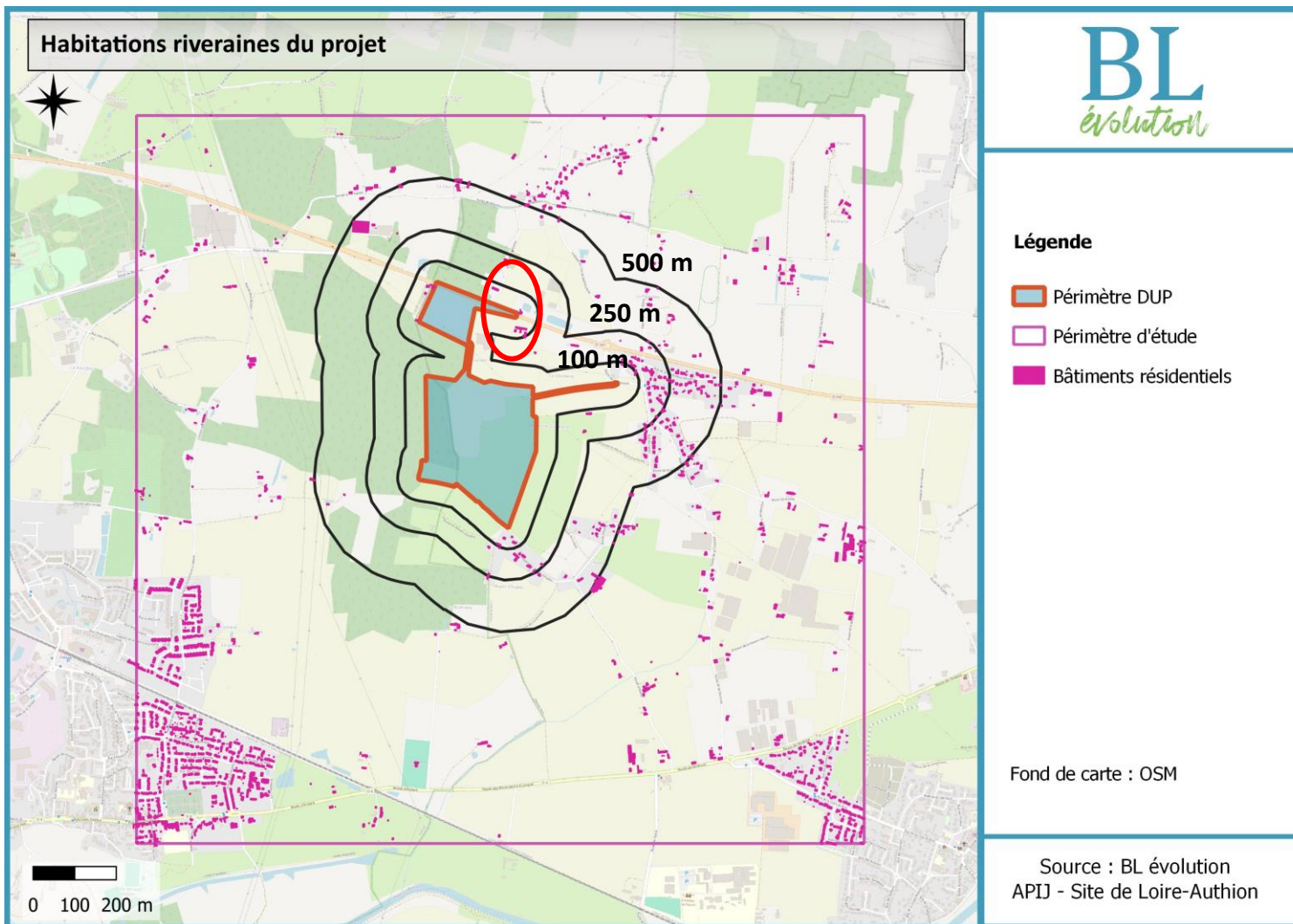
Voies d'accès - Opération de construction d'un établissement pénitentiaire près de Angers (49)

- Légende**
- Aire d'étude rapprochée
 - Niveau d'enjeu écologique surfacique
 - Négligeable
 - Faible
 - Moyen
 - Fort
 - Niveau d'enjeu écologique linéaire
 - Moyen
 - Fort
 - Arbres à cavités remarquables
 - Arbre à cavité favorable aux insectes xylophages et aux chiroptères
 - Arbre à cavité abritant le Grand Capricorne et favorable aux chiroptères
 - Espèce végétale menacée
 - Anthémide fétide



La carte ci-contre sera un appui important dans l'analyse des enjeux du projet sur l'environnement nocturne.

Les enjeux humains



Présence d'habitations

La carte ci-contre présente les bâtiments résidentiels à proximité du périmètre d'étude. Il s'agit de la BD Topo (bâtiments) de l'IGN) où sont filtrés les bâtiments résidentiels uniquement

Sur le périmètre, quelques habitations sont présentes à moins de 100 mètres au sud du périmètre du projet et au nord à proximité de la voie d'accès. Ensuite plusieurs habitations sont présentes en 100 et 250 mètres au nord-est du projet.

Les habitations au-delà de 250 mètres ne devraient pas être touchées par des éclairages directs

Enjeu de pollution lumineuse faible.

Obscurité et lumière :

Cette première partie a permis de mettre en avant la pollution lumineuse directe et indirecte sur le projet à l'état initial. Différents éléments sont à retenir :

- Le site s'inscrit dans une zone sans point lumineux à l'intérieur du périmètre de la DUP mais quelques éclairages à proximité. Cela implique que le projet et sa périphérie sont plutôt épargnés par la pollution lumineuse directe. Ainsi, la pollution lumineuse directe pourra être une source importante d'impact dans un contexte de mise en lumière l'EP Loire-Authion.
- Du point de vue de la pollution lumineuse indirecte, à l'échelle régionale, le site s'inscrit dans des conditions touchées par le halo lumineux angevin qui s'étale sur de nombreux kilomètres au-delà de la limite urbaine stricte.
- A une échelle plus locale, le périmètre est influencé par les lumières de la ville d'Angers, de Trélazé et du centre-bourg de Loire-Authion au sud-est. L'obscurité du ciel est typique des zones suburbaines avec une qualité sous influence. Un fait très visible par les émissions captées par le satellite qui sont présentes sur tout le sud et l'ouest du territoire, avec une concentration forte au niveau de la commune d'Angers.
- En conclusion, la pollution lumineuse directe est peu présente sur le territoire d'étude, avec des espaces préservés mais un halo lumineux tout de même présent.

Enjeux :

Les enjeux écologiques:

- Le périmètre s'inscrit dans un site avec une naturalité certaine. On retrouve plusieurs espèces qui peuvent présenter une sensibilité à la pollution lumineuse. Les enjeux sur les espèces s'orientent en priorité sur les chauves-souris, les insectes puis les oiseaux et les amphibiens. Pour les insectes, aucune investigation n'a été menée de nuit, mais la diversité des insectes de jour peut impliquer une bonne diversité des espèces nocturnes.
- Pour les autres espèces, les enjeux restent plus faibles, notamment car les espaces restent peu favorables aux autres taxons.
- Concernant la cohérence des écosystèmes, plusieurs éléments de la trame verte et bleue sont présents à proximité du territoire. D'un point de vue de la trame noire, ceux-ci peuvent représenter un enjeu surtout dans la cohérence entre les réservoirs de biodiversité.

Enjeux humains :

Les premiers bâtiments se situent à moins de 100 mètres du projet. Les autres habitations restent relativement éloignées pour représenter un enjeu.

La scénarisation de la pollution lumineuse du projet permettra de confirmer cette première analyse des enjeux et faciliter l'analyse des impacts du projet.

Simulation de la pollution lumineuse du futur projet

Modélisations prédictives

Principes :

La scénarisation est basée sur un plan de masse transmis dans le cadre de l'étude d'impact de la pollution lumineuse. Ce travail doit permettre d'évaluer la production de lumière et de pollution lumineuse afin de pouvoir mettre en avant les potentiels impacts du projet sur l'environnement nocturne.

L'étude se déroule donc en deux temps :

- 1. Modélisation de l'éclairage :** afin d'analyser la pollution lumineuse directe, une simulation d'éclairage au sol selon les différents espaces est réalisée à partir des données connues à ce jour et des exigences réglementaires. De plus, l'étude est complétée par un appui sur un scénario type d'éclairage d'un centre pénitentiaire similaire.
- 2. Modélisation de l'obscurité :** cette simulation consiste à exploiter la simulation de l'éclairage et d'estimer les émissions de lumière qui vont altérer l'obscurité. Cela va dépendre des éclairages, de la diffusion du halo lumineux mais aussi de la qualité de l'obscurité à l'état initial.

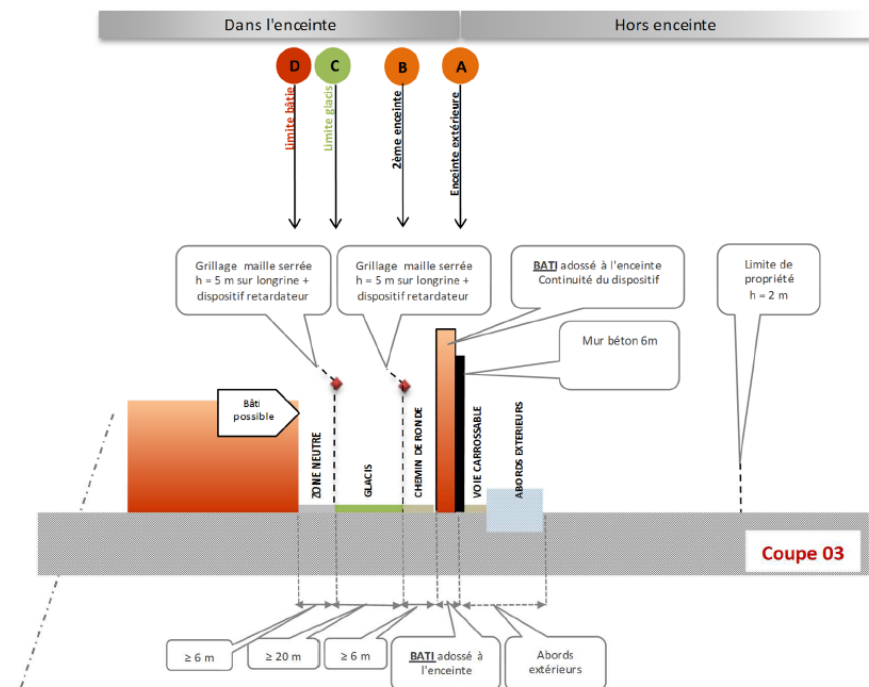
Il est important de noter qu'au stade de l'étude (février 2023), les éléments transmis ne sont pas encore arrêtés. Ainsi, la simulation est établie pour retranscrire une première analyse avec les données disponibles. De plus, le plan de masse donne des indications sur un possible emplacement de bâtiment et d'enceinte, mais aucun scénario d'éclairage (emplacement, type, nombre d'éclairage) n'est transmis à ce stade.

Ainsi, cette simulation est établie avec les éléments connus, reflétant une situation possible, mais ne peut être définie comme une situation finale.

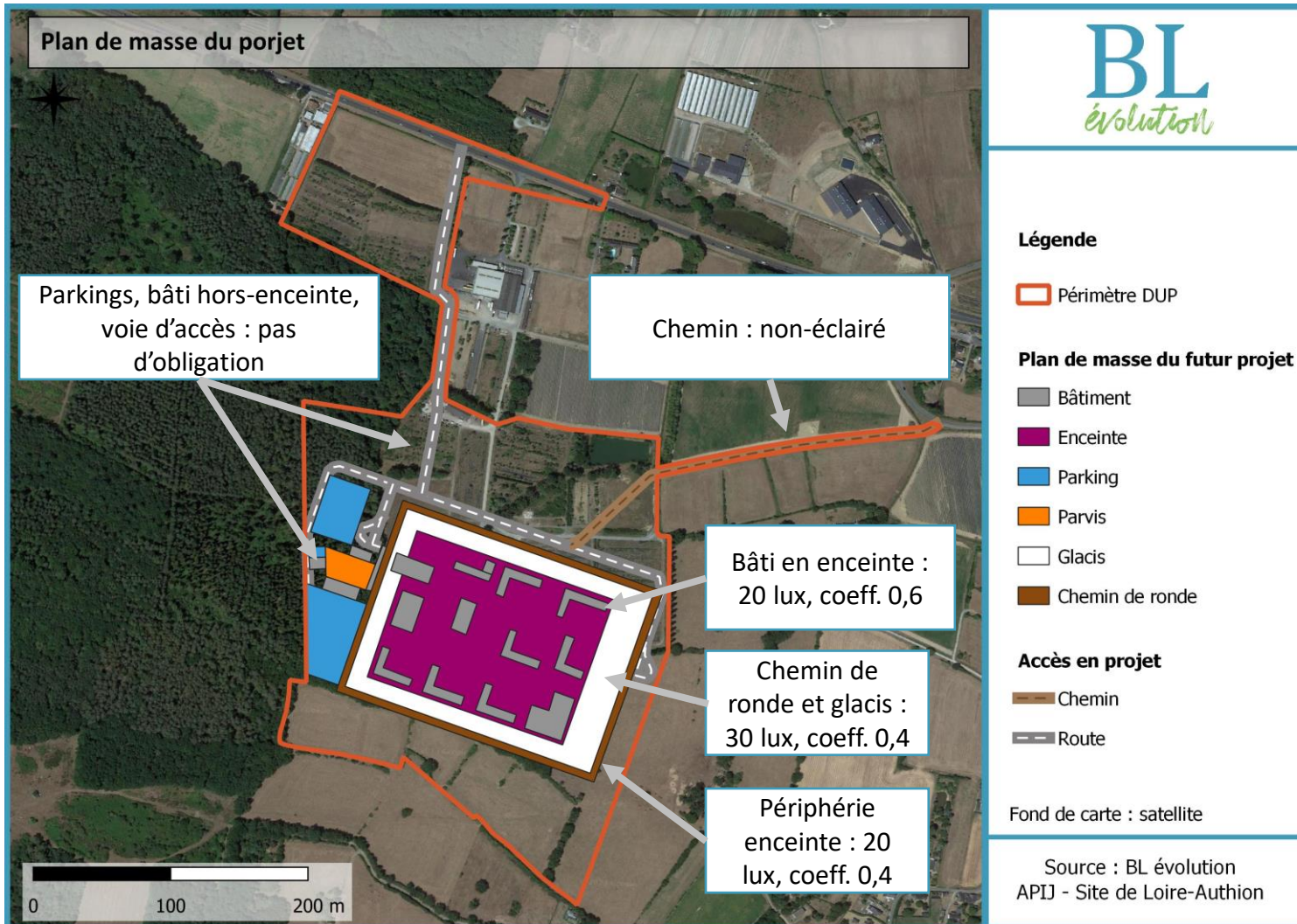
Méthode de scénarisation :

Pour scénariser la pollution lumineuse, nous nous appuyons sur les éléments techniques connus à ce stade de l'étude. Ainsi nous disposons du plan de masse des périmètres et enceintes du futur projet :

- Limites bâties et espaces extérieurs en enceinte
- Chemin de ronde, Glacis, Zone Neutre
- Surface hors enceinte, parking et bâtiments hors enceinte



Plan de masse et exigences réglementaires



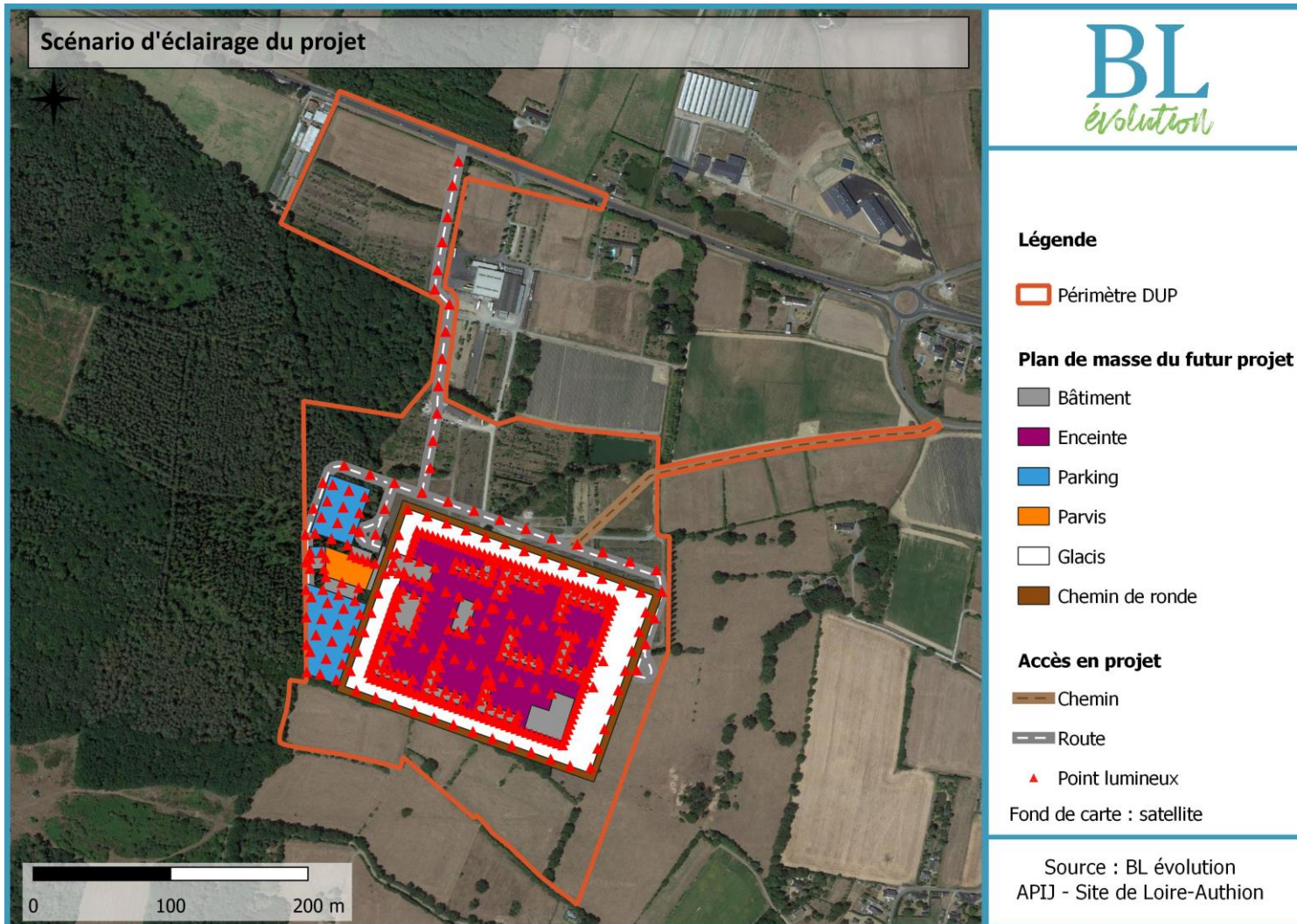
L'étude intervenant particulièrement en amont, la simulation d'éclairage s'appuie uniquement sur les exigences réglementaires transmises par l'APIJ et la répartition des périmètres. Ces exigences sont limitées à la définition d'un éclairage moyen ainsi qu'un coefficient d'uniformité.

Ce coefficient (d) est le rapport entre l'éclairage minimum (E_{min}) et l'éclairage moyen (E_{moy}).

Il permet de définir le niveau de confort visuel nécessaire, c'est-à-dire que plus il est élevé, plus les zones éloignées des sources doivent disposer d'un éclairage fort. Par exemple : avec un éclairage moyen de 20 lux et un coefficient de 0,4, l'éclairage minimum sur la zone doit être de 8 lux, alors qu'avec un coefficient de 0,6, l'éclairage minimum doit être de 12 lux (donc un meilleur confort visuel).

A noter que le chemin à l'est du projet ne sera pas éclairé.

Simulation de la position des points lumineux sur le futur projet



Le projet est constitué de 5 zones avec des éclairages différents attendus :

Les bâtiments en enceinte et hors enceinte:

Les bâtiments seront éclairés par des luminaires placés sur les façades avec :

- Hauteur de 6 mètres
- Une puissance modérée (LED 50W)

Mur d'enceinte intérieur:

- Hauteur de 4 mètres, un point tous les 8 mètres
- Puissance modérée (LED 40W)

Mur d'enceinte extérieur :

- Hauteur 6 mètres et un luminaire tous les 30 mètres
- Puissance modérée (LED 40W)

Parking et parvis :

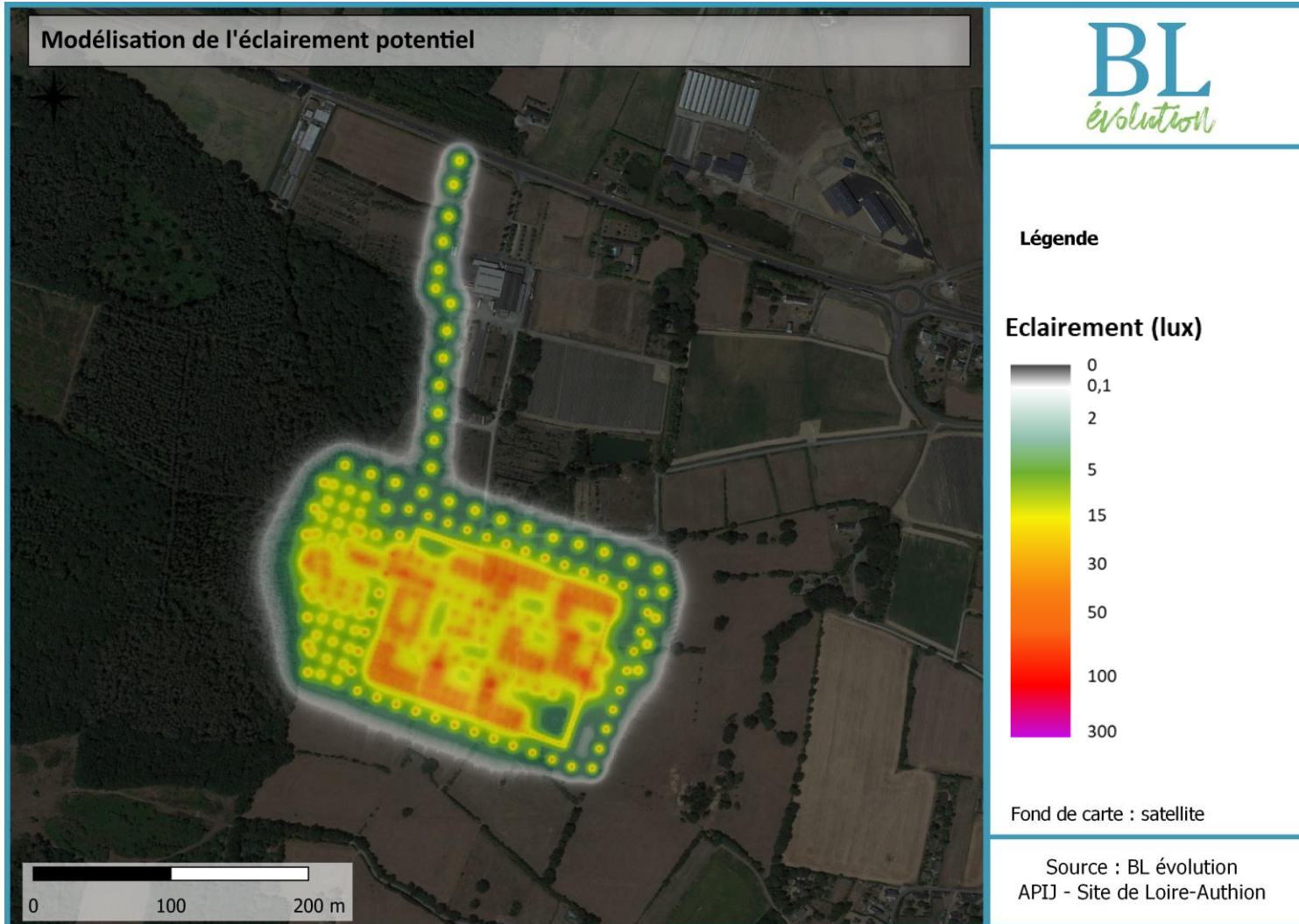
- Hauteur 8 mètres et un luminaire tous les 25 mètres
- Puissance modérée (LED 50W)

Voie d'accès :

- Hauteur 6 mètres et un luminaire tous les 30 mètres
- Puissance modérée (LED 40W)

Cette disposition théorique est surtout placée pour garantir les obligations réglementaires.

Modélisation des éclairagements estimés



La simulation montre un éclairage plus concentré et plus important au niveau des bâtiments et de l'enceinte centrale. Au centre l'éclairage peut atteindre jusqu'à 65 lux.

Les enceintes extérieures et glacis ont un éclairage pouvant atteindre 30 lux, avec une certaine homogénéité (points lumineux rapprochés).

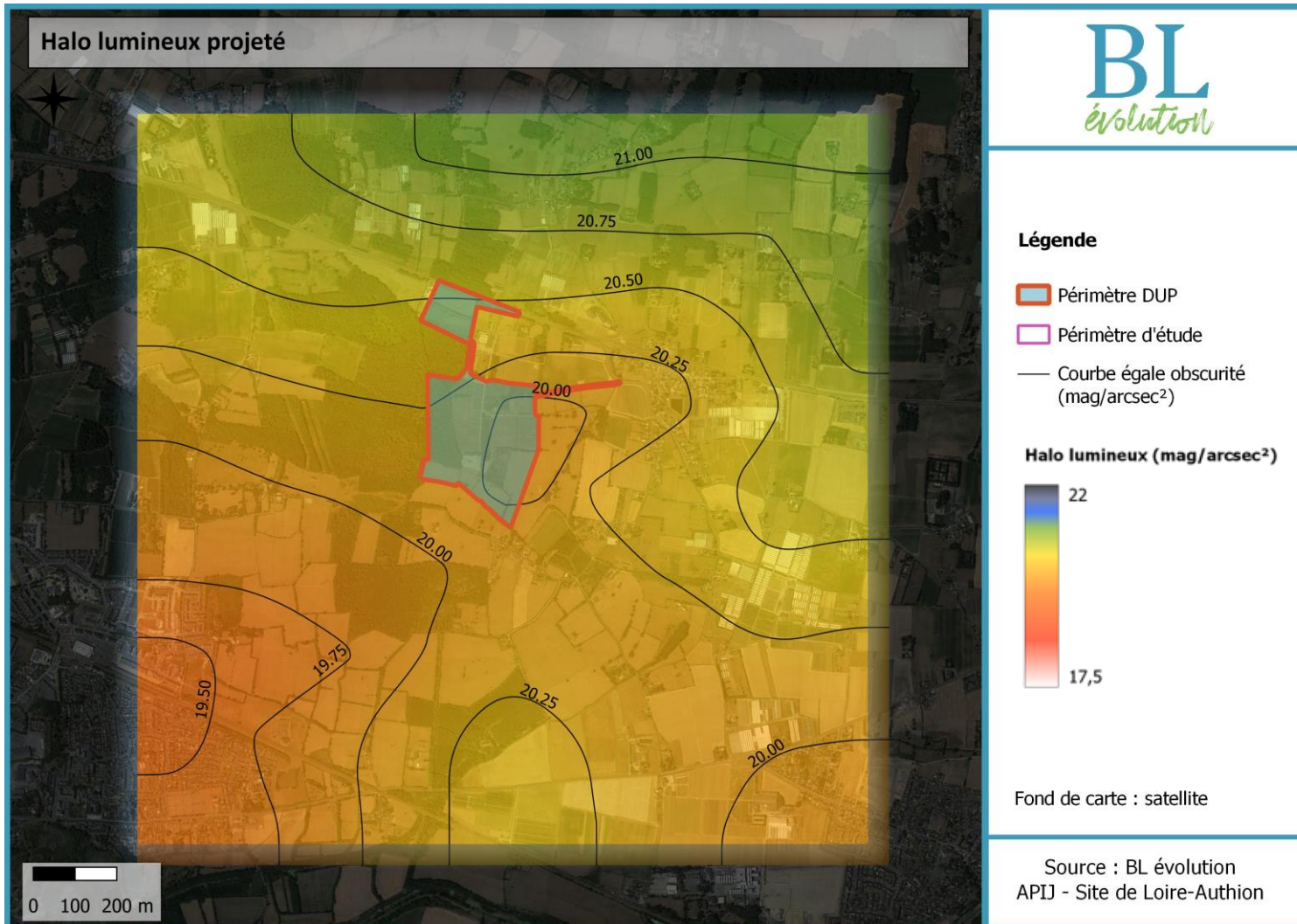
L'éclairage sur les zones parking visiteurs et personnels peut jusqu'à 40 lux au maximum.

La voie d'accès du projet pourrait atteindre un éclairage maximal de 30 lux au niveau des points lumineux.

La surface réceptrice d'un éclairage minimum peut atteindre 80 mètres au-delà des points lumineux.

À partir de cette modélisation de l'éclairage, nous avons procédé au calcul permettant de convertir les données d'éclairage en luminance ($\text{candela}/\text{m}^2$) pour estimer, de manière théorique, l'influence du futur projet sur l'obscurité du périmètre d'étude. Cela permet estimer la qualité de l'obscurité du ciel, après la mise en place du projet.

Modélisation du halo lumineux du projet



Les résultats de la simulation du halo lumineux potentiel montrent une implication relative dans la qualité de l'obscurité du ciel. En effet, la transformation des données d'éclaircissement en magnitude montre une influence au niveau du périmètre du projet et des espaces proches.

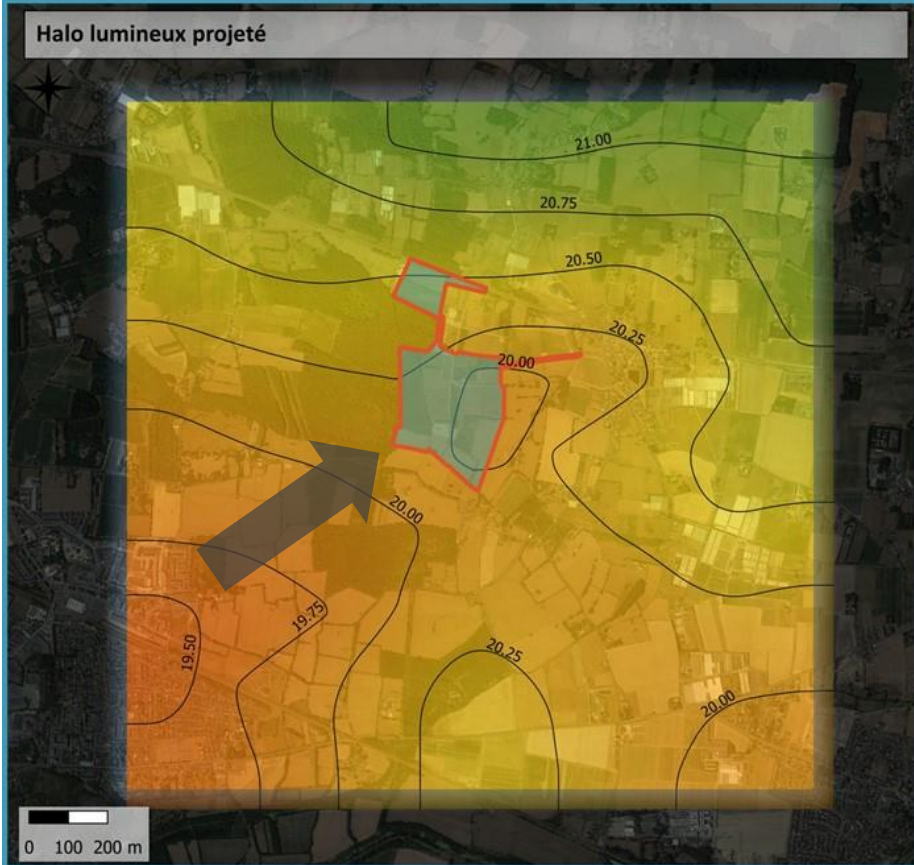
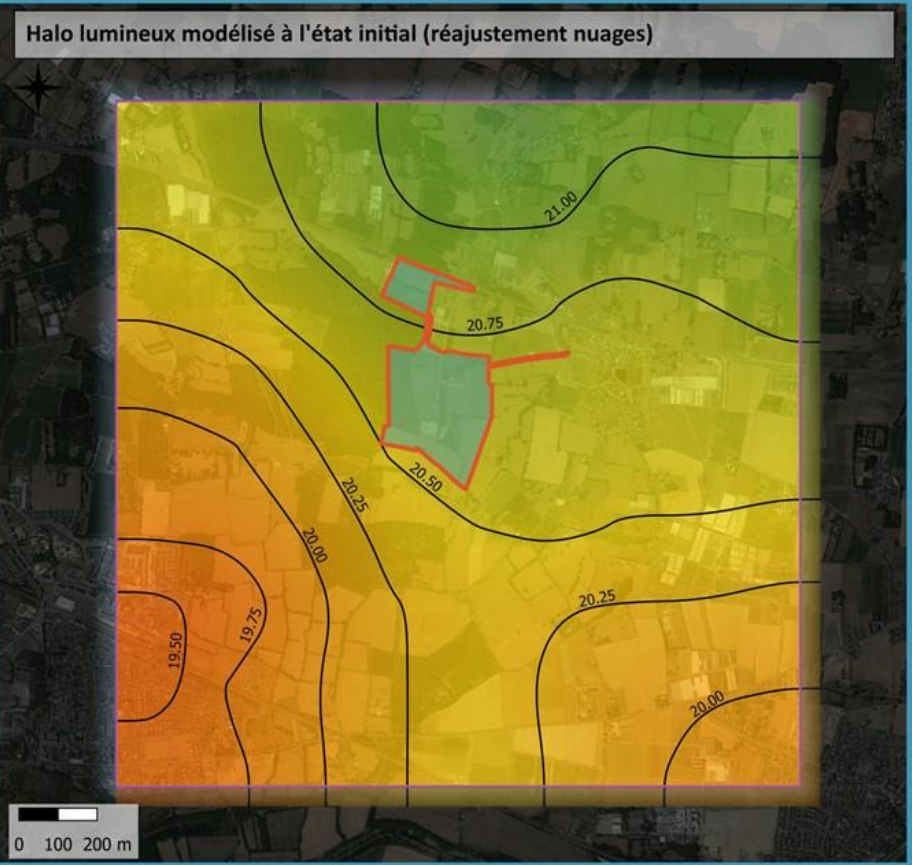
L'influence la plus importante est concentrée au centre du projet, avec une magnitude qui atteint 20,00 mag/arcsec² par rapport à 20,65 mesurée à l'état initial.

La modélisation implique un coefficient de diffusion théorique de la magnitude à proximité du projet. Ainsi, les résultats montrent une influence des éclairages au-delà du projet, qui régresse avec la distance.

Globalement, l'influence du nouveau projet va amener une magnitude de 20,00 mag/arcsec² mesurée initialement au sud-ouest, à s'étendre en direction du nord-est jusqu'au projet, et altérant de **manière modérée** la qualité de l'obscurité du ciel à proximité du site.

L'altération de la qualité de l'obscurité du ciel reste relative mais marquée au centre du projet.

Comparaison des halos lumineux avant et après projet



BL
évolution

Légende

- ▭ Périmètre DUP
- ▭ Périmètre d'étude
- Courbe égale obscurité (mag/arcsec²)

Fond de carte : satellite

Source : BL évolution
APIJ - Site de Loire-Authion

Pollution lumineuse directe simulée:

L'analyse des éclairagements permet de mettre en avant différents points clés :

- Le projet étant peu avancé à ce stade, la modélisation de l'éclairage, des effets sur le halo lumineux et la qualité de l'obscurité du ciel restent aujourd'hui partiels et théoriques. L'emplacement exact des bâtiments finaux, des possibles annexes et par conséquent des points lumineux ne sont pas connus précisément. Ainsi la modélisation implique plusieurs hypothèses pour simuler les résultats.
- La simulation théorique de l'éclairage montre que le niveau le plus élevé est à attendre principalement au centre du périmètre au niveau des espaces bâtis. Les zones extérieures à l'enceinte recevront un éclairage non-négligeable.
- La simulation implique aussi la présence d'éclairages sur les parties extérieures des périmètres des enceintes. Ainsi ces éclairages peuvent avoir une influence jusqu'à 85 mètres au-delà du périmètre, pouvant atteindre certains espaces naturels et les habitations potentielles proches.

Pollution lumineuse indirecte :

La simulation théorique montre une altération relative au niveau du projet :

- Le premier élément à comprendre dans cette analyse, c'est que le projet s'inscrit dans une obscurité déjà dégradée par l'influence du halo lumineux d'Angers, de Trélazé et de Loire-Authion au sud et à l'ouest du projet.
- Les résultats de la modélisation font apparaître une altération qui sera la plus importante au niveau du projet et dans sa proximité. La diffusion du halo lumineux montre une dégradation de l'obscurité au-delà des limites du projet mais qui régresse rapidement.
- La simulation implique que le projet va contribuer à prolonger le halo lumineux de l'agglomération d'Angers en direction du nord-est, pour atteindre une magnitude équivalente à la celle mesurée initialement au sud.
- La simulation implique l'hypothèse qu'aucune source d'éclairage ne soit orientée en direction du ciel, limitant ainsi une trop forte dégradation.
- De manière générale, le projet va impliquer une modification plus importante de la qualité de l'obscurité du ciel au niveau des espaces bâtis, qui sont déjà soumis à d'autres contraintes issues de la construction (artificialisation des sols). Autour du projet, la modification de la qualité de l'obscurité du ciel reste relative, notamment car il s'inscrit dans un ciel déjà touché par un halo lumineux important.
- Les principaux enjeux du projet s'orientent plutôt sur la pollution lumineuse directe.

Les effets probables du projet

Etude des impacts du projet sur les espèces présentes et les habitats

La partie étude d'impact doit permettre d'estimer les effets de la mise en lumière du futur projet sur la biodiversité et sur la santé et le bien-être des riverains et des personnes concernées.

Étude d'impact sur la biodiversité

L'étude d'impact est réalisée par taxons et sur les habitats de manière générale, présents sur le secteur d'étude et sur le périmètre du projet.

La question de la pollution lumineuse est un enjeu étudié qui reste relativement récent. Même si les effets de la lumière sont connus depuis longtemps, la réponse des espèces appartenant à un même taxon peut être différente selon les espèces. C'est le cas par exemple des chauves-souris, comme l'a démontré J. Pauwels, la majorité des espèces vont fuir la lumière, mais d'autres comme les Pipistrelles, peuvent au contraire profiter de l'éclairage pour s'en approcher et pour s'alimenter avec la forte présence d'insectes nocturnes qui sont eux piégés par les flux lumineux. L'estimation au stade d'intervention de l'étude restent donc globaux.

La flore :

Enjeux à l'état initial :

- Richesse importante
- Espèces avec préoccupations mineures

Impacts du projet après simulations

L'enjeu faible identifié à l'état initial reste maintenu. Les liens avec la flore restent peu interprétables aujourd'hui et les impacts vont plutôt s'orienter sur la transformation des espaces que par la pollution lumineuse.

Les reptiles

Enjeux à l'état initial :

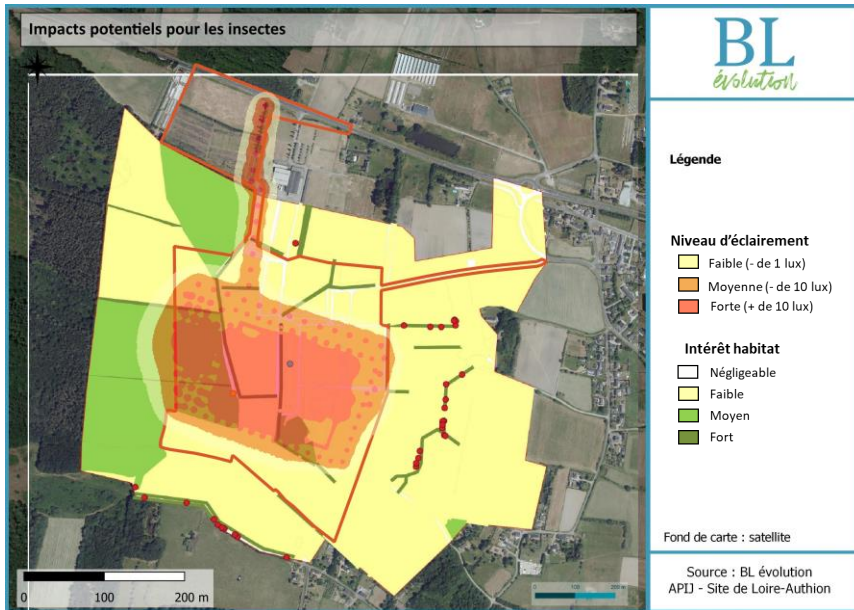
- Richesse écologique faible
- Quelques habitats favorables
- Espèces peu concernées par la mise en lumière

Impacts du projet après simulations

Les connaissances des enjeux de pollution lumineuse sur ces espèces restent particulièrement faibles. On ne dispose pas aujourd'hui d'un socle solide sur les enjeux de la pollution lumineuse sur les reptiles terrestres.

Les effets probables du projet sur la biodiversité

Enjeux zone « encinte »



Enjeux zone « accès »



Les invertébrés :

Enjeux à l'état initial :

- Richesse entomologique ; Habitats favorables ; Forts enjeux de mise en lumière

Impacts du projet après simulations

Les impacts du projet s'orientent sur les questions de pollution lumineuse directe. Les flux lumineux pourront avoir un pouvoir d'attraction important, provoquant éblouissement et déclenchant les réflexes de phototactismes positifs des potentielles espèces. Les zones éclairées pourront devenir un piège, impliquant une surmortalité.

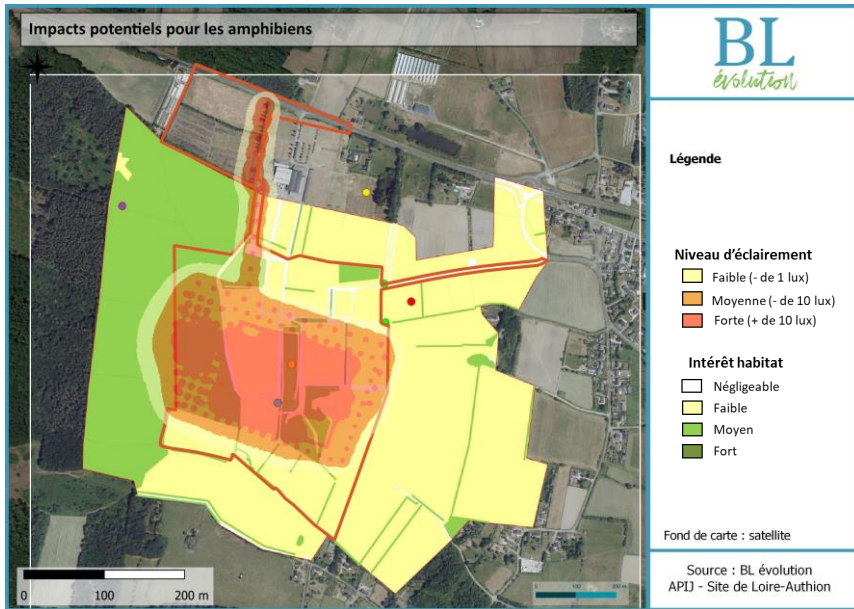
Des éclairagements importants pourront toucher des zones à habitat avec un intérêt fort au niveau de haies et moyen à l'est et au nord du périmètre.

Impacts :

- **Surmortalité : Attraction des insectes et modification des rapports proies/prédateurs.**
- **Barrière écologique : difficulté de franchissement des zones éclairées.**

Les effets probables du projet sur la biodiversité

Enjeux zone « enceinte »



Enjeux zone « accès »



Amphibiens :

Enjeux à l'état initial :

- Habitats favorables
- Plusieurs espèces remarquables présentes
- Forte sensibilité à la lumière

Impacts du projet après simulations

Plusieurs habitats favorables, avec un intérêt moyen, vont être mis en lumière. C'est notamment des milieux présents autour du projet et l'espace forestier à l'ouest qui seront touchés.

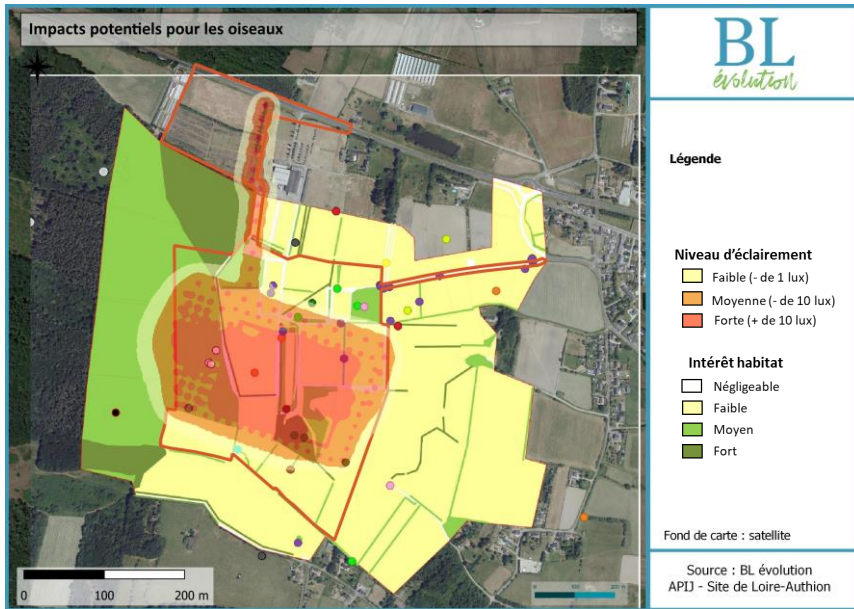
La mise en lumière (et la construction du projet) va altérer certaines haies favorables aux déplacements au sein du périmètre du projet et alentours.

Impacts :

- **Dérangements et atteintes des cycles biologiques : réduction et altération de la reproduction**
- **Contraintes des déplacements**

Les effets probables du projet sur la biodiversité

Enjeux zone « encinte »



Enjeux zone « accès »



Avifaune :

Enjeux à l'état initial :

- Richesse moyenne
- Des espèces avec un enjeu fort et des espèces sensibles à la pollution lumineuse (rapaces nocturnes)
- Forte sensibilité à la lumière (rapace et espèces migratrices)

Impacts du projet après simulations

Des habitats d'intérêts forts seront directement mis en lumière, notamment au nord-ouest du projet.

Certaines haies aussi très pertinentes pour l'avifaune recevront un éclaircissement faible à moyen. Notamment sur la zone « voie d'accès ».

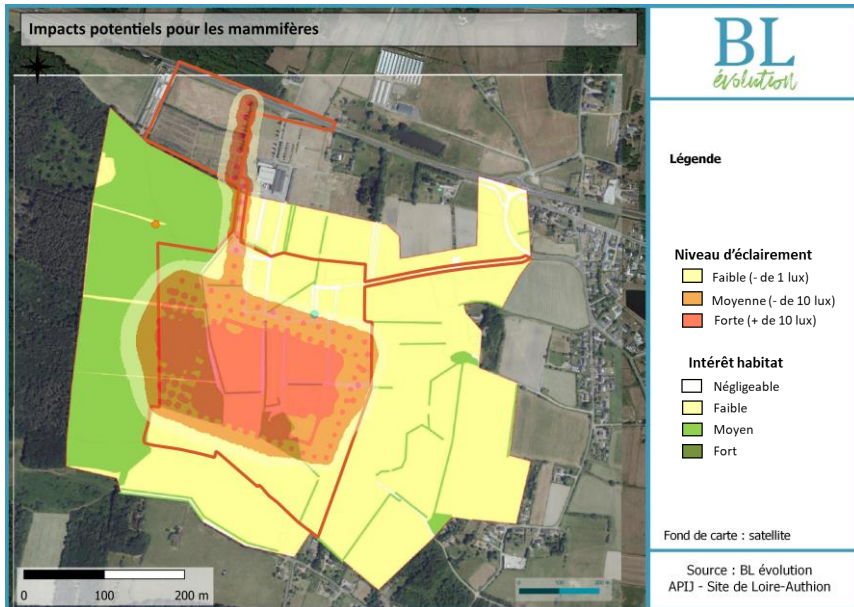
Enfin une partie de la forêt à l'ouest pourra recevoir un éclaircissement non négligeable.

Impacts :

- **Niches : recul des zones de nidage des oiseaux diurnes (haies, forêt).**
- **Rapaces nocturnes : fuites des espèces.**
- **Barrière écologique : grande migration difficile/rallongée/retardée.**

Les effets probables du projet sur la biodiversité

Enjeux zone « enceinte »



Enjeux zone « accès »



Mammifères terrestres :

Enjeux à l'état initial :

- Richesse moyenne
- 2 espèces remarquables
- Des enjeux modérés de mise en lumière

Impacts du projet après simulations

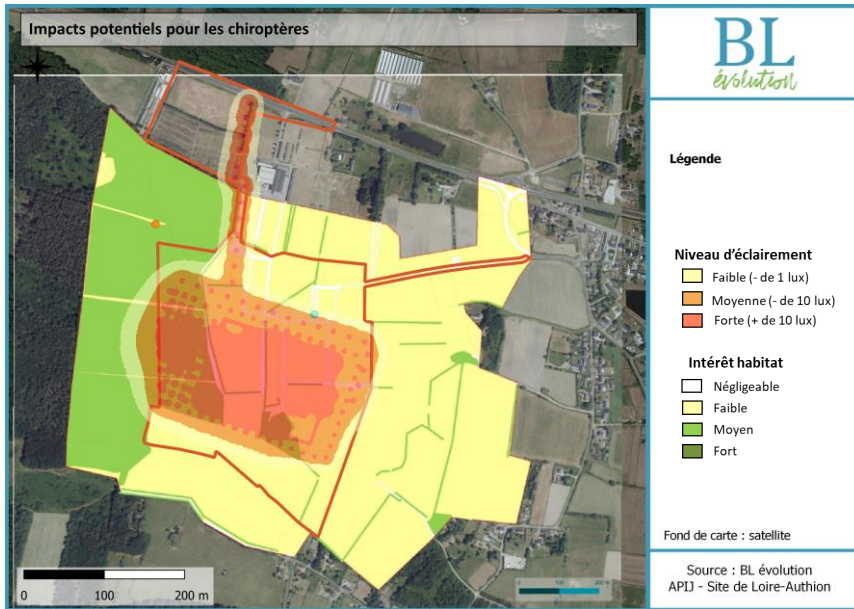
Une nouvelle fois certains espaces avec un intérêt moyen seront touchés par des éclaircissements directs. Ce sont de nouveaux les haies qui sont présentes au sein de la zone d'enceinte et de la zone d'accès, ainsi que la forêt à l'ouest qui seront exposées aux impacts de la pollution lumineuse directe.

Impacts :

- Fuite des espèces vers des espaces sans lumière.
- Barrières écologiques : altération des déplacements et obligation de contourner le projet

Les effets probables du projet sur la biodiversité

Enjeux zone « encinte »



Enjeux zone « accès »



Chiroptères :

Enjeux à l'état initial :

- Richesse importante
- 3 espèces à enjeux
- Une forte sensibilité à la lumière

Impacts du projet après simulations

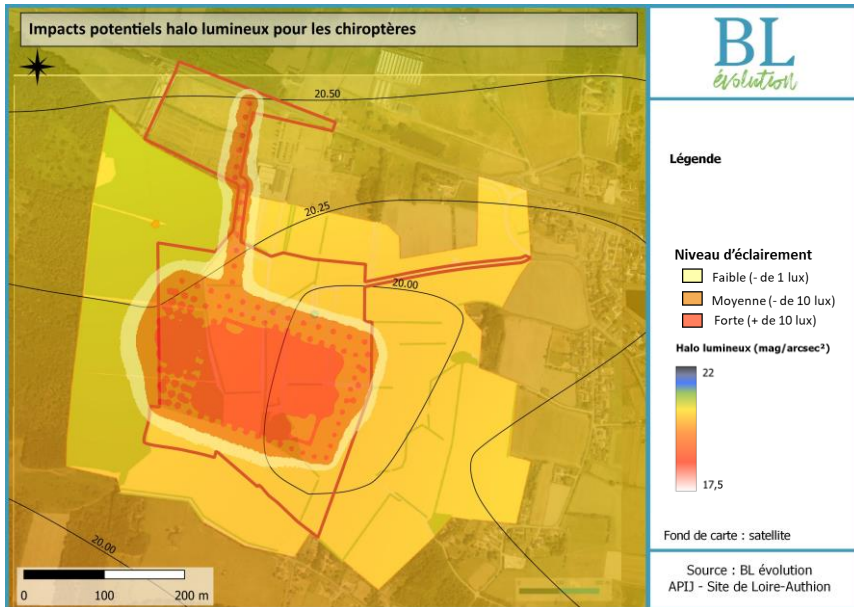
La mise en lumière aura des répercussions importantes sur les chauves-souris. Notamment au niveau des haies qui traverses le projet et qui sont identifiées avec un intérêt fort; Les zones nord-est et sud-est, avec aussi un intérêt fort pourront recevoir de la lumière directe.

Les effets de la lumière peuvent faire fuir les espèces lucifuges et attirer les espèces adaptées (comme la pipistrelle commune), en modifiant l'équilibre proie/prédateur. Dans les deux cas, la mise en lumière aura des répercussions fortes.

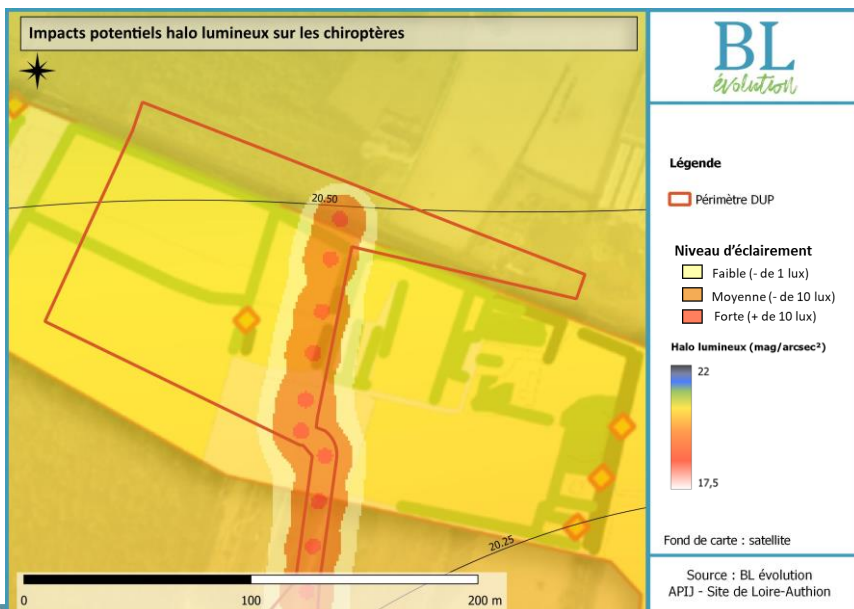
La zone d'accès qui se compose de haies, sera particulièrement impactée par la mise en lumière.

Les effets probables du projet sur la biodiversité

Enjeux zone « enceinte »



Enjeux zone « accès »



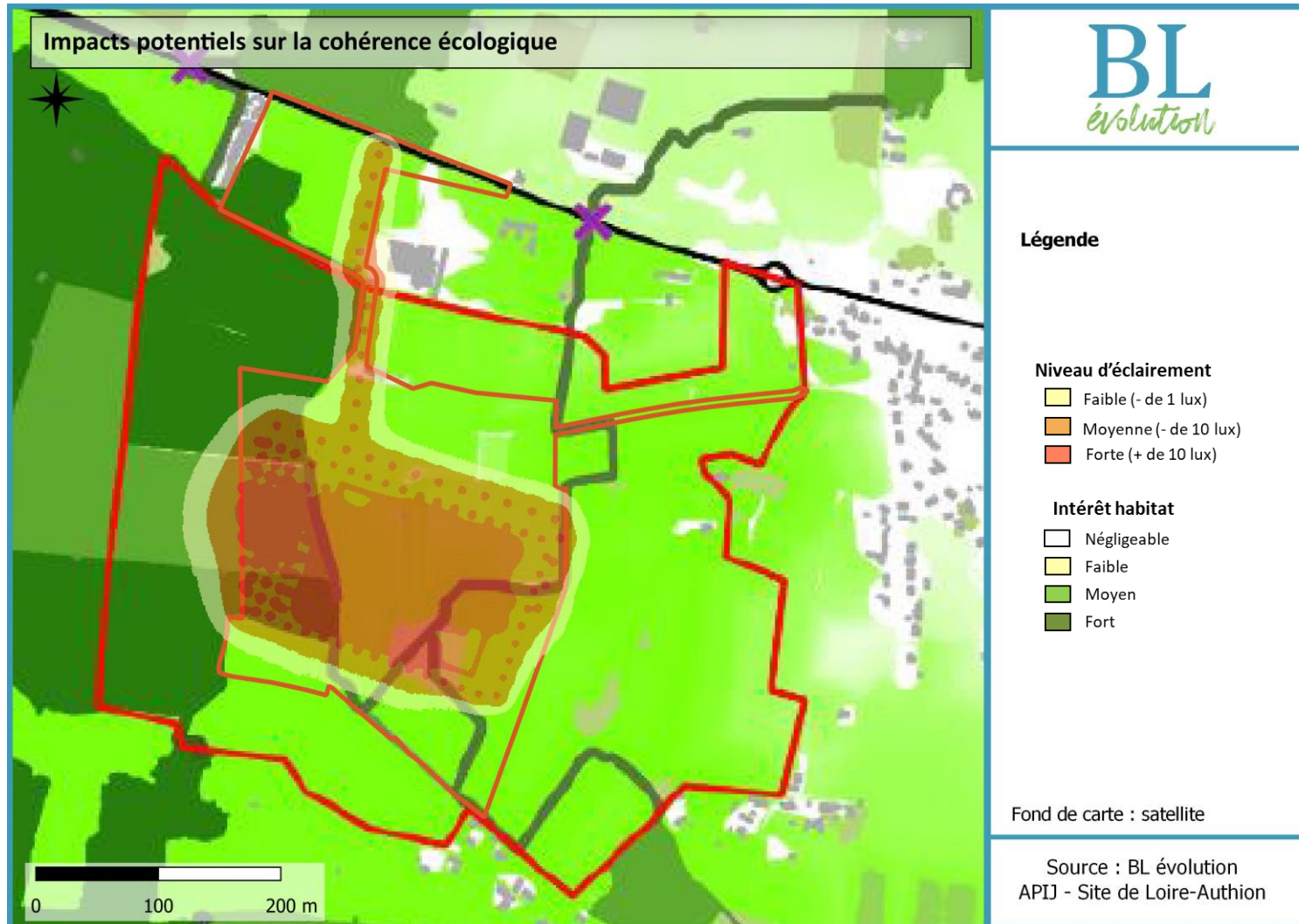
Les halos lumineux de fortes intensités sont aussi particulièrement impactants pour les chauves-souris, qui y sont particulièrement sensibles. Les chiroptères dont un des seuls taxons faisant l'objet d'étude au regard des enjeux d'halo lumineux. C'est pourquoi, une analyse est dédiée pour ce taxon.

La simulation fait apparaître une intensification du halo lumineux local, passant de 20,6 mag/arcsec² à 20,00 mag/arcsec².

Une modification du halo lumineux, même sans éclairages directs, pourra avoir une incidence négative sur ce taxon.

Impacts :

- Disparition des espèces lucifuges et recul des gîtes.
- Barrières écologiques : altération des déplacements et obligation de contourner le projet
- Modification des relations proies prédateurs, disparition des zones de chasse pour les espèces lucifuges et nouvelles zones pour les espèces adaptées.



Trame noire

Enjeux à l'état initial

- La forêt à l'ouest du projet est un réservoir de biodiversité pertinent
- Des éléments fragmentants proches
- Une matrice de corridors écologiques particulièrement favorables

Impacts du projet après simulations

La simulation montre une altération de l'obscurité au sein de la forêt à l'ouest du projet.

L'emplacement du projet et son éclaircement s'inscrit dans un corridor écologique favorable.

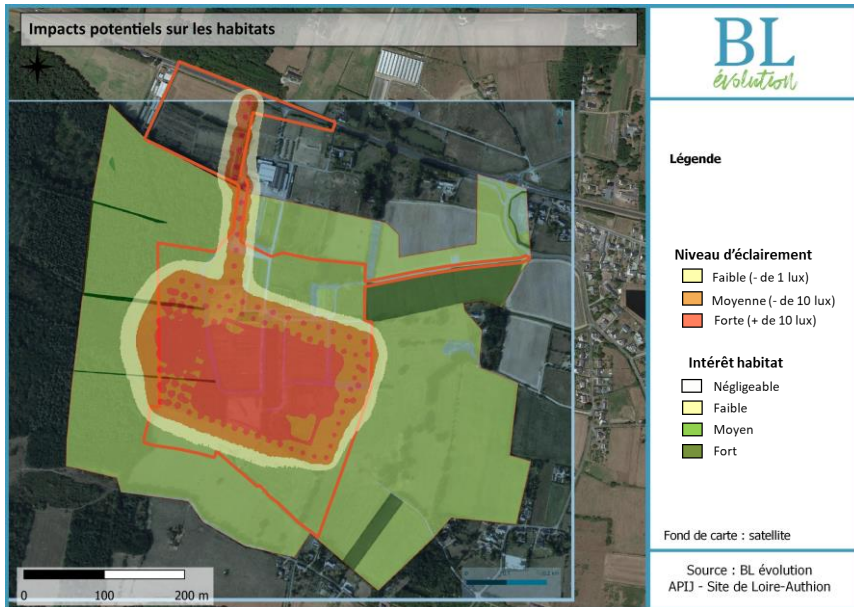
Les déplacements nord/sud vont être détournés, en obligeant les espèces à contourner le projet.

Impacts :

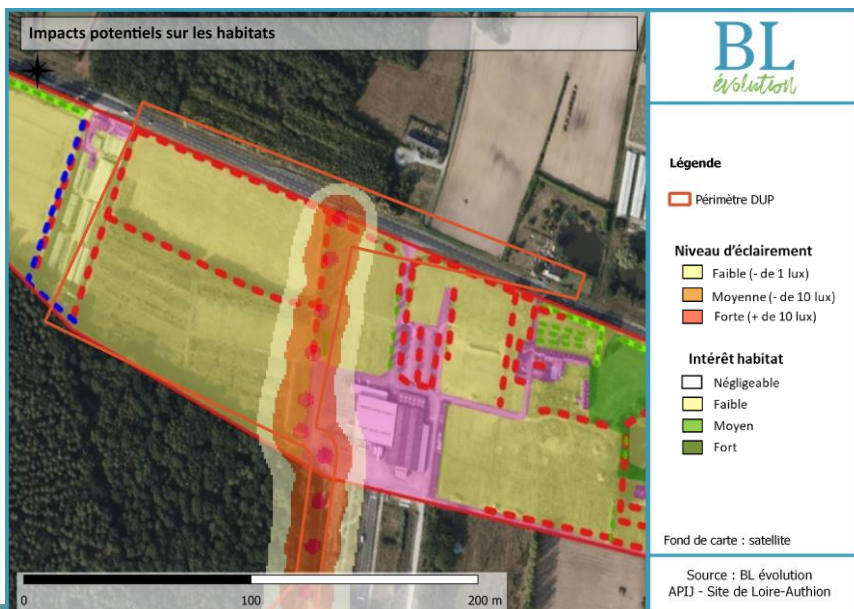
- **Eclaircement direct d'un réservoir de biodiversité initialement obscur**
- **Barrière écologique : coupure écologique d'un corridor obscur**

Impacts sur les habitats

Enjeux zone « encinte »



Enjeux zone « accès »



Trame noire locale

Enjeux à l'état initial

- Des habitats pouvant avoir des enjeux très forts
- Des haies pertinentes pour les déplacements

Impacts du projet après simulations

Pollution lumineuse directe : Plusieurs espaces à intérêt moyen ou fort pourront recevoir de la lumière au-delà des limites du projet.

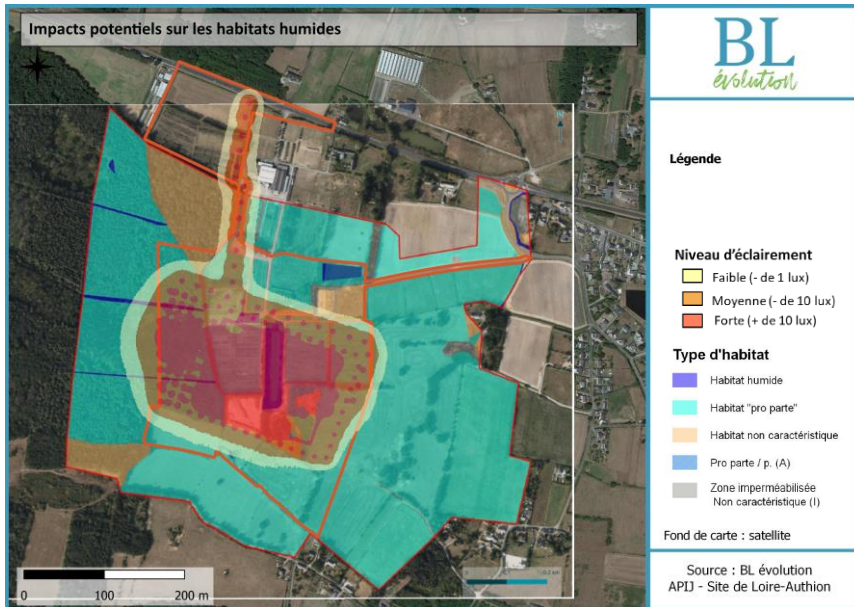
Pollution lumineuse indirecte : modification des conditions d'obscurité initiales dans habitat à intérêt moyen ou fort.

Impacts :

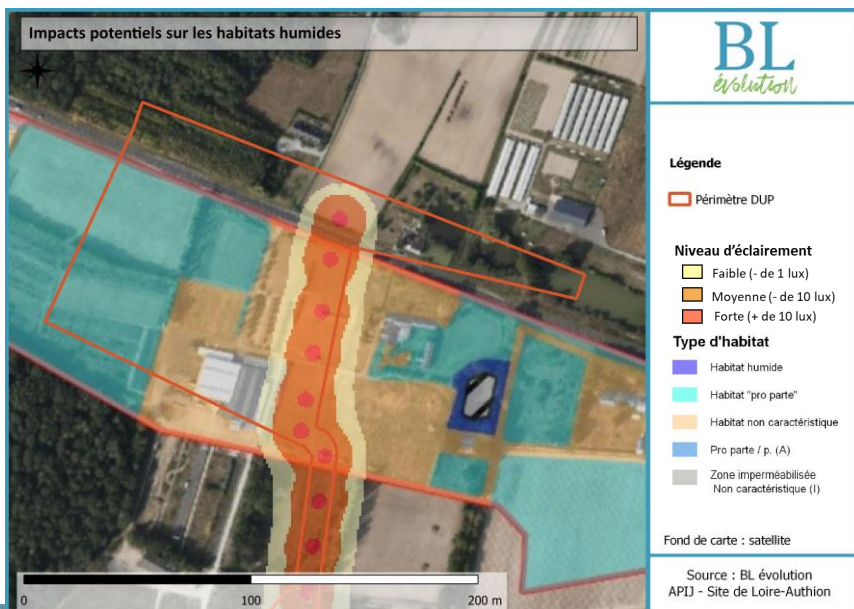
- **Modification des conditions d'obscurité des habitats : modification des fonctions écologiques de ces habitats (niche, reproduction, déplacements, ...)**

Impacts sur les habitats humides

Enjeux zone « encinte »



Enjeux zone « accès »



Zones humides

Impacts du projet après simulations

Pollution lumineuse directe : selon la simulation plusieurs habitats humides vont recevoir un éclairage direct. Ces espaces sont particulièrement favorables aux conditions de vie d'espèces (insectes, oiseaux, chiroptères, mais aussi aux espèces aquatiques). Une mise en lumière directes de ces espaces pourra engendrer des incidences notables.

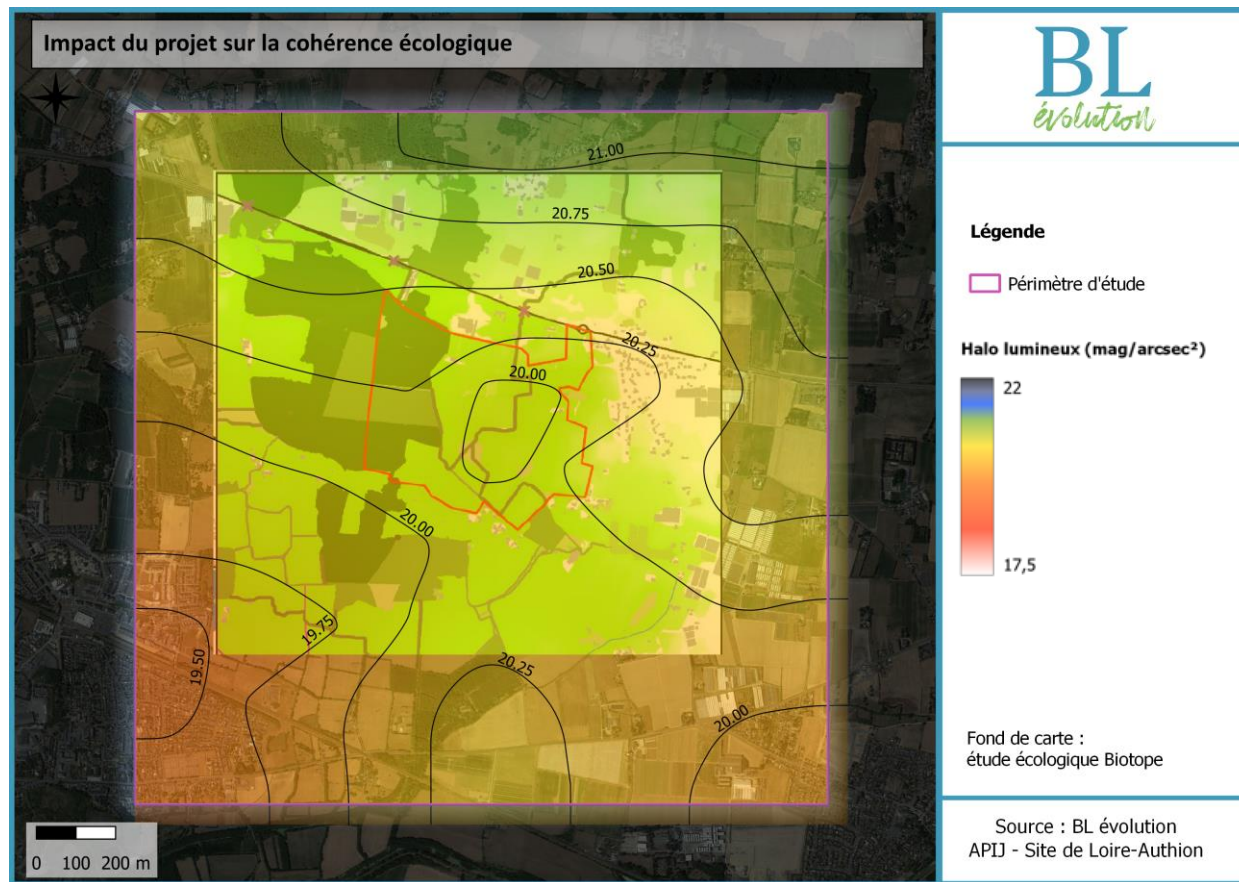
Les impacts d'une modification du halo lumineux restent peu renseignés à ce jour sur les zones humides. Néanmoins, comme pour les autres habitats, le projet entrainera une modification des conditions initiales.

Sur la zone « accès » les enjeux sont limités.

Impacts :

- Impacts sur les espèces associées aux habitats humides

Impacts sur les habitats humides



Hiérarchisation des enjeux

La notion d'impact en pollution lumineuse s'enrichit rapidement, avec les nombreuses recherches scientifiques, avancées et découvertes qui progressent sur le sujet, disposant aujourd'hui d'un corpus scientifique solide. De nombreux impacts sont caractérisés par des notions nouvelles établies par une veille scientifique importante.

Pour la pollution lumineuse, la notion d'étude d'impact reprend les grands traits d'une étude d'impact écologique. Cependant, certaines doctrines de ces études ne sont pas (ou difficilement) applicables à la pollution lumineuse. Il est nécessaire de bien comprendre que :

- La physique de la lumière et sa propagation induit un impact du projet diffus.
- Actuellement, les études et recherches scientifiques montrent que l'impact de la lumière est très important pour les écosystèmes. Cependant, il peut se combiner à d'autres facteurs notamment le bruit (pollution sonore). Dans ce sens, les impacts sont à prendre avec une notion de forte potentialité, mais d'autres facteurs peuvent jouer un rôle majeur.
- La notion d'impacts résiduels est difficile à caractériser dans le sens où une seule source peut avoir des impacts mais ils seront très faibles. La notion d'impacts résiduels est donc à prendre avec un certain recul, car l'impact net nul ou positif n'est pas atteignable.

- La notion de compensation n'est pas applicable aujourd'hui à la pollution lumineuse, car non-cohérente avec les milieux (il faudrait éteindre des zones naturelles similaires qui ne sont techniquement pas éclairées, sinon elles ne disposent pas d'un environnement nocturne similaire). Toutefois, les compensations environnementales définies par l'étude d'impact écologique doivent intégrer la notion de pollution lumineuse. Si une zone de compensation est établie pour ce projet, celle-ci doit disposer d'une ambiance lumineuse au minimum similaire.

L'étude d'impact de la pollution lumineuse est établie selon l'échelle de niveaux suivante :

Nul	Faible	Modéré	Fort	Très fort
Non concerné	L'impact aura des effets mais ne mettront pas en danger les populations (Potentiel)	L'impact aura des effets avérés mineurs sur les populations (Pas d'irréversibilité pour les écosystèmes)	Le projet aura un effet avéré majeur sur les populations et pourra mettre en danger les plus vulnérables (disparition locale probables d'espèces en danger)	Le projet aura un effet dangereux et irréversible sur l'ensemble de la population sur le projet

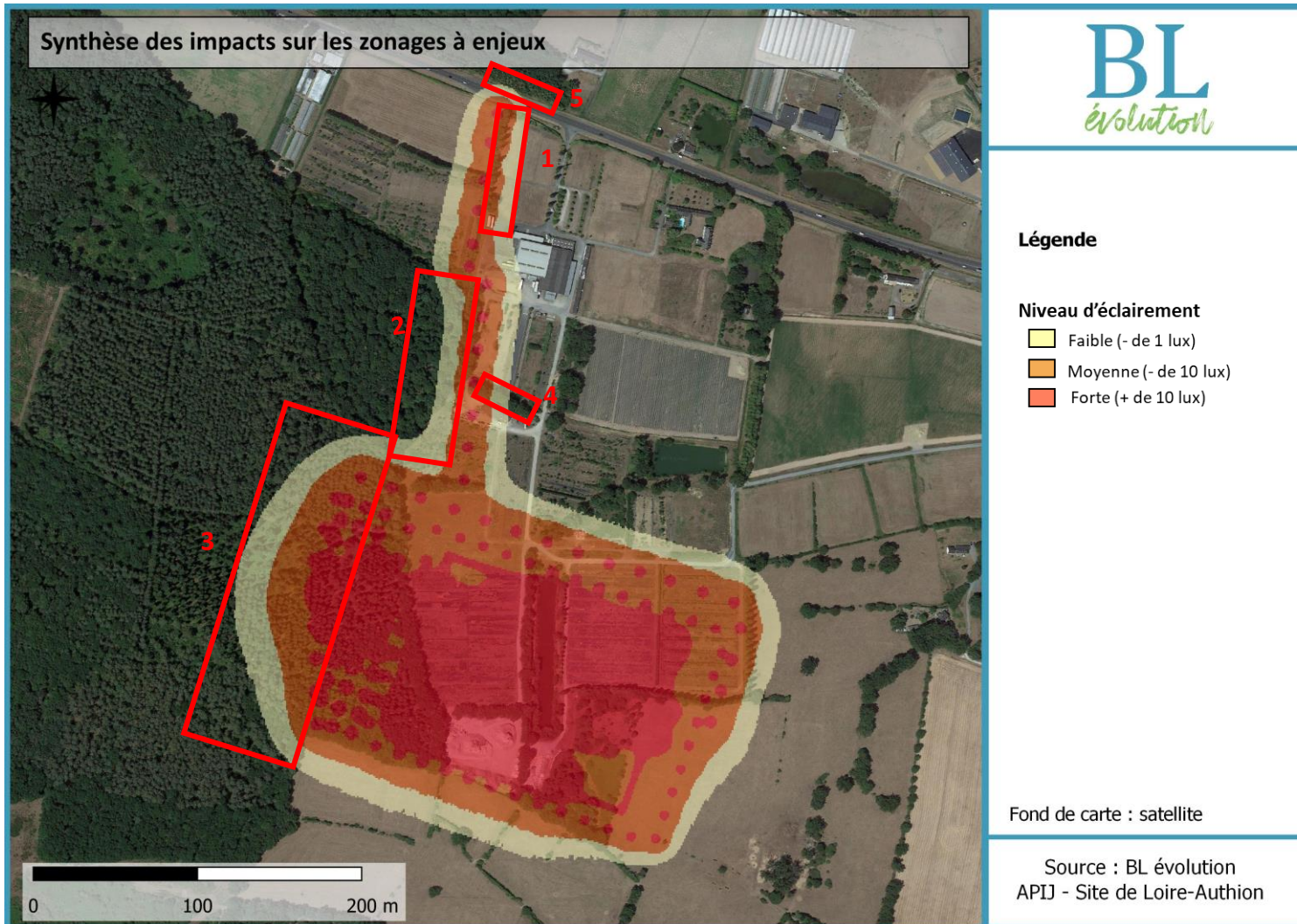
Synthèse des impacts

Taxons	Impacts	Impacts retenus au regard de la simulation
Flore	<ul style="list-style-type: none"> • Peu significatifs 	Faible
Invertébrés	<ul style="list-style-type: none"> • Surmortalité : Attraction des insectes et modification des rapports proies/prédateurs. • Barrière écologique : difficulté de franchissement des zones éclairées.. 	Modéré
Amphibiens	<ul style="list-style-type: none"> • Dérangements et atteintes des cycles biologiques : réduction et altération de la reproduction • Contraintes des déplacements 	Modéré
Reptiles (hors tortues)	<ul style="list-style-type: none"> • Peu significatifs 	Faible
Oiseaux	<ul style="list-style-type: none"> • Niches : recul des zones de nichage des oiseaux diurnes (haies, forêt). • Rapaces nocturnes : fuites des espèces. • Barrière écologique : grande migration difficile/rallongée/retardée. 	Modéré
Mammifères (hors chiroptères)	<ul style="list-style-type: none"> • Fuite des espèces vers des espaces sans lumière. • Barrières écologiques : altération des déplacements et obligation de contourner le projet 	Faible
Chiroptères	<ul style="list-style-type: none"> • Disparition des espèces lucifuges et recul des gîtes. • Barrières écologiques : altération des déplacements et obligation de contourner le projet • Modification des relations proies prédateurs, disparition des zones de chasse pour les espèces lucifuges et nouvelles zones pour les espèces adaptées. 	Fort

Synthèse des impacts

Taxons	Impacts	Impacts retenus au regard de la simulation
Trame noire	<ul style="list-style-type: none">• Eclaircissement direct d'un réservoir de biodiversité initialement obscur• Barrière écologique : coupure écologique d'un corridor obscur	Modéré
Habitats locaux	<ul style="list-style-type: none">• Modification des conditions d'obscurité des habitats : modification des fonctions écologiques de ces habitats (niche, reproduction, déplacements, ...)	Modéré
Habitats humides	<ul style="list-style-type: none">• Impacts sur les espèces associées aux habitats humides	Modéré

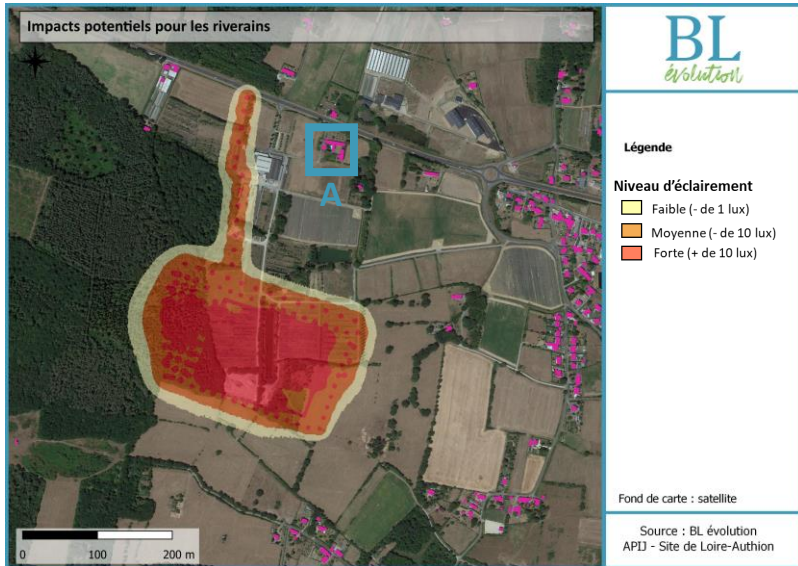
Synthèse des zonages à enjeux



Parmi les plus importants enjeux, on distingue 4 zones qui sont à forte valeur écologique qui seront impactés par le projet :

1. La haie au nord de la zone d'accès. Cette haie est particulièrement favorable aux déplacements des chiroptères et des mammifères, mais aussi pour les oiseaux.
2. Le massif forestier sur la zone d'accès. Cet espace ne sera pas impliqué dans une modification d'occupation du sol, néanmoins, il pourra recevoir un éclaircissement élevé
3. Le massif forestier à l'ouest du projet global. Ce massif forestier est voué à être artificialisé par le projet. Mais il s'ajoute une pression lumineuse suite à l'émission de points lumineux proches.
4. Une seconde haie au niveau de la voie d'accès. Cette haie est identifiée comme un enjeu pour l'ensemble des taxons.
5. La forêt au nord de la route n'a pas fait l'objet d'analyses, néanmoins, cet espace favorable aux espèces (notamment chiroptère) pourra recevoir de l'éclaircissement dans une certaine mesure.

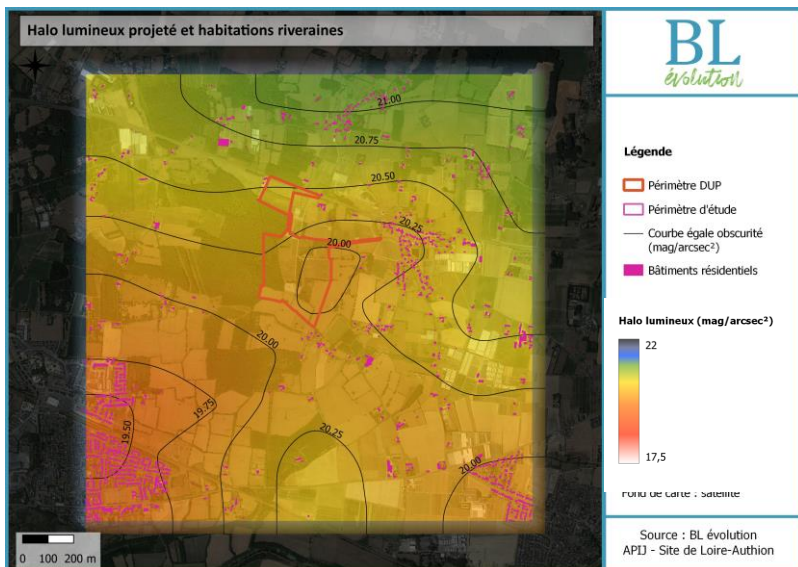
Impacts des riverains



Aucune source de lumière simulée n'atteindra les habitations riveraines du projet. De plus, le monument situé à l'est du chemin d'accès (A) ne devrait pas recevoir pas de lumière directe.

Néanmoins, la mise en lumière pourra modifier les conditions d'obscurité notamment au nord-est du projet.

Une modification qui aura un impact mineur, voire nul, sur la santé des populations riveraines, mais pourra par exemple limiter la visibilité du ciel étoilé.



Eviter et réduire les impacts

Limiter et réduire l'impact : mesures générales

Concernant les mesures correctrices, elles sont établies avec les réflexions actuelles qui interviennent particulièrement en amont du projet et ne concernent donc pas les techniques d'éclairages précises pour limiter les impacts, car les dispositifs ne sont pas encore définis. Cependant, de manière globale, il est nécessaire de :

- Limiter au maximum la diffusion de lumière en direction du ciel et dans l'environnement proche par une bonne maîtrise des flux pour limiter la participation du projet au halo lumineux.
- Limiter l'utilisation de lumière bleue, plus impactante pour l'Homme et la biodiversité (et notamment les chauves-souris). Les lumières bleues sont aussi la source d'un renforcement de l'intensité des halos lumineux. En réduisant l'utilisation de cette couleur dans les flux, on limite leur intensité.
- Viser une sobriété lumineuse en répondant de manière précise aux besoins et se restreindre au nécessaire.
- Utiliser des éclairages performants et peu consommateurs pour limiter le gaspillage d'énergie.

La couleur des flux :

La couleur des flux lumineux joue un rôle majeur dans la perturbation de la faune. Ceci s'explique essentiellement par la définition des longueurs d'ondes au sein des différentes technologies. Aujourd'hui, la technologie LED est la plus présente sur le marché et son spectre lumineux est défini par la couleur de température. Pour faire simple, plus la température de couleur de la LED est élevée, plus le flux sera composé de bleu et au contraire plus elle est faible, plus la couleur sera le jaune/orange.

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

La figure représente le type d'impacts par longueurs d'onde pour chaque taxon. Selon l'analyse des impacts des projets, il ressort notamment la question des chauves-souris- des insectes et des oiseaux. Selon cette étude menée par l'OFB et R. Sordello, il est donc nécessaire de privilégier des températures de couleurs basses qui émettent le moins de bleu et de vert possible. Pour cela, si des LED sont installées, il est donc important de s'orienter sur des températures de couleur ne dépassant pas 2700K, voire des LED ambrées qui n'émettent pas dans les courtes longueurs d'ondes.

Les tons chauds sont particulièrement bénéfiques pour limiter les impacts sur l'avifaune, sur les insectes, les amphibiens ou encore les chiroptères.

La limitation de l'immixtion de lumière

L'objectif est cette fois de contenir au maximum les flux lumineux à l'intérieur du projet pour éviter toute immixtion de lumière directe en direction de l'environnement. Pour cela, il existe plusieurs techniques :

- La maîtrise des flux vers l'intérieur. L'objectif porté par cette maîtrise est d'orienter les flux à l'intérieur du projet et d'éviter toutes sources directes en direction de l'environnement proche. Pour cela, il est nécessaire de porter une réflexion sur l'orientation des sources et de s'assurer de n'éclairer que là où c'est nécessaire.
- Éclairer en direction du sol. Il s'agit une nouvelle fois de maîtriser les flux, en portant cette fois la volonté de limiter la lumière en direction du ciel. La lumière en direction du ciel participe à la perturbation des espèces volantes, notamment dans la migration, mais aussi de réduire la participation des éclairages au halo lumineux.

- Limiter la densité de lumière et le sur-éclairage des surfaces. Plus l'éclairage est important plus il va avoir des effets directs sur les espèces, mais aussi sur la santé humaine. Le sur-éclairage est aussi responsable de la réverbération de la lumière au sol qui accentue l'intensité du halo lumineux. L'indicateur le plus intéressant pour traiter ce sujet est la Densité Surfaccique de Flux Lumineux Installé (DSFLI). La DSFLI correspond au flux lumineux total des sources rapporté à la surface destinée à être éclairée, en lumens par mètre carré. C'est-à-dire un ratio entre le nombre de lumens total (toutes les sources comprises) et la surface à éclairer.
- Il est nécessaire que ce ratio ne dépasse pas 20 lumen/m². C'est-à-dire que pour une surface de 100m² et que deux sources éclairent cette surface, il faut que le nombre lumen total des deux sources produisent au maximum à 2000 lumen (soit 1000 lumen chacune).

Objectifs	Surface à éclairer 100m ²	Objectifs DSFLI : 20 lm/m ²	Nombre de lampadaire prévu : 2
Calcul	Calcul : 100m ² * 20 lm/m ² = 2000 lumen		
Résultats	Lumen max de mes sources : 2000lumen / 2 lampadaires prévus = 1000 lumen		

- Créer des zones d'obscurité favorables aux déplacements : pour garantir une cohérence écologique favorable notamment aux chauves-souris, aux mammifères ou aux insectes. La mise en place de structures végétales permettant de créer de l'ombre semble être un moyen particulièrement intéressant. C'est notamment la mise en place de haies et d'espaces arborés qui permettent aux espèces de se déplacer en maintenant des zones d'obscurité à l'abri d'une possible lumière d'ambiance issue de la réverbération.

Mesures en lien avec les habitats et les espèces à enjeu pour le projet

Pour éviter et réduire au maximum les enjeux, il sera nécessaire de limiter au maximum l'immixtion de lumière en direction des habitats remarquables.

Pour cela des préconisations techniques sont nécessaires :

- **Orienter les flux vers l'intérieur du projet** : il est nécessaire que les éclairages les plus à l'extérieur aient un flux qui soit strictement orienté à l'intérieur du projet. Cela diminuera fortement le risque d'un éclairage des haies, corridors à grandes faunes et du cours d'eau intermittent.
- **Limiter la hauteur des éclairages** : si un éclairage est nécessaire aux abords du périmètre extérieur, réduire la hauteur des mats permettra de limiter l'immixtion de lumière au-delà de la zone qui nécessite de l'éclairage.
- **S'orienter sur des LED ambrées** : les LED ambrées présentent la particularité de limiter les flux de lumière bleue par rapport à d'autres LED. Adapter les éclairages à la biodiversité pourra se montrer pertinent. Un renforcement de ce principe (LED inférieures à 2700K) sur les parties externes sera bénéfique.
- **Mettre en place des solutions passives pour couper les flux** : pour limiter la possibilité d'éclairage, des haies peuvent être mises en place entre le projet et les habitats proches.
- **Limiter l'éclairage au strict nécessaire pour ne pas impliquer un sur-éclairage** : limiter le nombre de lampadaires surtout sur la zone ouest et les annexes.
- **Eteindre/moduler l'éclairage lorsque c'est possible** : si la réglementation peut contraindre les éclairages en enceinte, une réflexion sur l'extinction des parkings, voie d'accès et des bâtiments hors-enceinte peut être intéressante pour limiter l'immixtion de lumière. L'installation de détecteurs de mouvement peut compléter cette volonté.
- **S'assurer de mettre en place des vasques étanches** : ce principe est d'éviter que les insectes puissent entrer en contact avec les ampoules, afin de limiter la mortalité. Ces vasques étanches doivent avoir un indice de protection de 6.5 minimum.
- **Limiter strictement les ULOR à 0 et prévoir des couleurs de sols sombres** : afin de limiter le halo lumineux du projet par lumière directe mais aussi par la réverbération du sol.
- **Mettre en place des éléments favorables aux espèces** : plutôt dans une réflexion de compensation, il serait intéressant de mettre en place des nichoirs à chauves-souris dans une zone non éclairée par le projet par exemple.
- **S'accorder avec les objectifs de l'étude écologique** : il peut être aussi pertinent de ne pas éclairer directement des potentielles zones de compensation définies par les études écologiques.
- **Avoir une réflexion sur les flux lumineux** : il sera nécessaire de porter une attention majeure sur tous les flux lumineux et notamment en portant un regard sur ce qui va être éclairé par rapport aux véritables besoins.
- **Ne pas éclairer la voie d'accès** : la voie d'accès représente un enjeu majeur, où les impacts pourraient facilement être évités en n'éclairant pas la voie d'accès.

Résumé des mesures et contextualisation

Mesures correctrices	Zones privilégiées	Bénéfices
Ampoule avec des températures de couleur basses (<2400K)	Tous les points lumineux Privilégier les espaces extérieurs et les voies d'accès	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction des impacts sur les espèces attirées par la lumière (notamment les insectes) • Réduction de la diffusion de la lumière
Moduler les puissances en cours de nuit	Tous les points lumineux	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction de tous les impacts
ULOR strictement = 0	Tous les points lumineux	<ul style="list-style-type: none"> • Limitation du halo lumineux
Extinction à 23h (voir 22h)	Parkings	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction des impacts sur les habitats sur la forêt à l'ouest, les haies et espaces au nord)
Mettre en place une haie couvrante tout autour du projet	Pourtour du projet	<ul style="list-style-type: none"> • Limitation de la diffusion de flux au-delà des espaces en enceinte. • Réduction des effets fragmentants de la lumière • Planter des espèces locales et adaptées
Limiter la hauteur des points lumineux à 5 mètres	Les espaces extérieurs, et intérieurs lorsque c'est possible	<ul style="list-style-type: none"> • Limitation de la diffusion de flux au-delà des espaces en enceinte. • Réduction des effets fragmentants de la lumière
Limiter le nombre de points lumineux	Définir le nombre de points lumineux minimum pour atteindre les objectifs réglementaires	<ul style="list-style-type: none"> • Limitation du halo lumineux
Mettre en place des sols sombres	Partout où c'est possible	<ul style="list-style-type: none"> • Limitation du halo lumineux
Eclairer vers l'intérieur de l'enceinte	Éclairages sur le pourtour du projet	<ul style="list-style-type: none"> • Limitation de la diffusion de flux au-delà des espaces en enceinte. • Réduction des effets fragmentants de la lumière
Réflexion sur la localisation des points lumineux	Limiter l'éclairage au maximum des espaces avec un intérêt moyen et fort	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction des impacts sur les habitats • Réduction des effets fragmentants de la lumière
Planter des nichoirs à chauves-souris dans des espaces sans lumière	En milieu sans lumière proche du projet	<ul style="list-style-type: none"> • Créer des milieux favorables

Limiter et réduire l'impact

Groupes étudiés	Mesure d'évitement	Mesures de réduction
FLORE	<ul style="list-style-type: none"> • Limiter l'éclairage direct à l'intérieur de l'enceinte • Limiter la densité de lumen par surface • Utiliser des températures de couleurs inférieures ou égales à 2700K • Eteindre les parkings et bâtiments hors-enceinte à 22h. • Ne pas éclairer la voie d'accès 	
INVERTÉBRÉS	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser un verre de protection Lampadaire avec un indice de protection (IP) supérieur à 65. • Limiter l'éclairage direct à l'intérieur de l'enceinte • Limiter la densité de lumen par surface • Eteindre les parkings et bâtiments hors-enceinte à 22h. • Limiter l'éclairage des haies et forêts • Ne pas éclairer la voie d'accès 	<ul style="list-style-type: none"> • Limiter l'éclairage direct à l'intérieur du projet • Utiliser des températures de couleurs inférieures ou égales à 2700K • Créer des zones d'obscurité autour du projet (haie)
AMPHIBIENS	<ul style="list-style-type: none"> • Limiter l'éclairage direct à l'intérieur de l'enceinte • Limiter la hauteur des éclairages inférieure ou égale à 4 mètres • Eteindre les parkings et bâtiments hors-enceinte à 22h. • Limiter l'éclairage des haies et forêts • Ne pas éclairer la voie d'accès 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser des températures de couleurs inférieures ou égales à 2700K • Créer des zones d'obscurité autour du projet (haie)
REPTILES	<ul style="list-style-type: none"> • Éclairer en direction du sol (ULOR=0) • Limiter l'éclairage direct à l'intérieur de l'enceinte • Limiter la densité de lumen par surface • Ne pas éclairer la voie d'accès 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser des températures de couleurs inférieures ou égales à 2700K • Créer des zones d'obscurité autour du projet (haie)
OISEAUX	<ul style="list-style-type: none"> • Éclairer en direction du sol (ULOR=0) • Limiter l'éclairage direct à l'intérieur de l'enceinte • Limiter la densité de lumen par surface • Limiter la hauteur des éclairages inférieure ou égale à 5 mètres • Eteindre les parkings et bâtiments hors-enceinte à 22h. • Ne pas éclairer la voie d'accès 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser des éclairages avec des tons chauds pour limiter les possibles impacts sur la migration générale des oiseaux • Créer des zones d'obscurité autour du projet (haie)
CHIROPTÈRES	<ul style="list-style-type: none"> • Éclairer en direction du sol • Limiter l'éclairage direct à l'intérieur de l'enceinte • Limiter la densité de lumen par surface • Eteindre les parkings et bâtiments hors-enceinte à 22h. • Limiter l'éclairage des haies et forêts • Ne pas éclairer la voie d'accès 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser des températures de couleurs inférieures ou égales à 2700K • Créer des zones d'obscurité autour du projet (haie) • Moduler les puissances de l'éclairage en cours de nuit • installer des nichoirs à chiroptères
MAMMIFÈRES	<ul style="list-style-type: none"> • Éclairer en direction du sol • Limiter l'éclairage direct à l'intérieur de l'enceinte • Limiter la densité de lumen par surface • Eteindre les parkings et bâtiments hors-enceinte à 22h. • Limiter l'éclairage des haies et forêt • Ne pas éclairer la voie d'accès 	<ul style="list-style-type: none"> • Créer des zones d'obscurité autour du projet (haie)

Conclusion non-technique

Pour conclure, l'étude de la pollution lumineuse pour le projet d'établissement pénitentiaire sur la commune de Loire-Authion montre une modification des conditions d'obscurité influencées par la nécessité de l'éclairage et les exigences réglementaires.

Le projet s'installe dans une zone rurale éloignée de grandes agglomérations, mais où le halo lumineux de l'agglomération angevine est encore très présent. Ainsi, le projet s'inscrit dans une zone avec aucun éclairage direct sur le projet, et qui sont peu nombreux aux alentours, mais l'obscurité reste altérée.

A l'état initial, différents enjeux ont été mis en avant sur la biodiversité alors que les enjeux humains semblaient être faibles. C'est notamment le cas des insectes, de l'avifaune (oiseaux) et des chiroptères qui montre des enjeux forts. Les enjeux de cohérences écologiques et d'habitats sont aussi importants. Ces enjeux sont surtout au niveau de la forêt et des espaces naturels au nord et les haies qui traversent le projet.

La modélisation prédictive intervient particulièrement en amont de l'étude de faisabilité, les données des éclairages ne sont pas encore connues. Cependant, en s'appuyant sur des exigences réglementaires, nous obtenons un éclairage théorique moyen. Les résultats montrent que les pourtours de l'enceinte seront éclairés, induisant une certaine diffusion des flux au-delà du périmètre. Ce qui pourra toucher des espaces naturels d'intérêt (comme la forêt ou les haies) par un éclairage direct de plusieurs lux.

Les données d'éclairage ont ensuite été traduites en diffusion généralisée pour estimer théoriquement l'évolution du halo lumineux et la qualité de l'obscurité du ciel post-projet.

A partir de ces simulations, les enjeux à l'état initial ont été comparés avec les enjeux de pollution lumineuse directe et indirecte.

En effet, la simulation théorique montre un éclairage potentiel d'habitats naturels. Ce qui va représenter un enjeu pour les oiseaux, les insectes ou encore les chiroptères, mais aussi potentiellement pour les déplacements et la vie qui est liée aux milieux humides, comme les amphibiens. Ces enjeux peuvent être potentiellement importants dans des conditions d'éclairage direct. Cependant, les mesures proposées peuvent permettre de limiter fortement les impacts.

Il reste important de travailler sur les paramètres des éclairages pour limiter au maximum la diffusion de lumière, de limiter les lumières trop blanches, de limiter les surfaces éclairées ou encore d'éteindre lorsque la réglementation le permet.

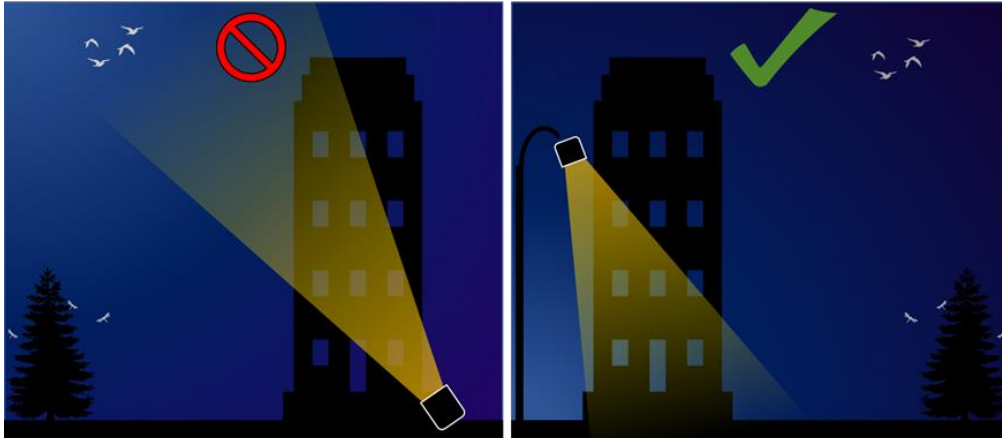
Concernant les riverains, aucun bâtiment accueillant potentiellement des riverains, ne recevra un éclairage direct.

Les impacts sur la biodiversité nocturne sont relativement importants, notamment au regard des conditions initiales d'obscurité et des enjeux identifiés. Les mesures correctrices doivent être suivies au maximum pour atténuer l'enjeu du projet d'EP de Loire-Authion

Préconisations générales

Maîtriser les flux lumineux

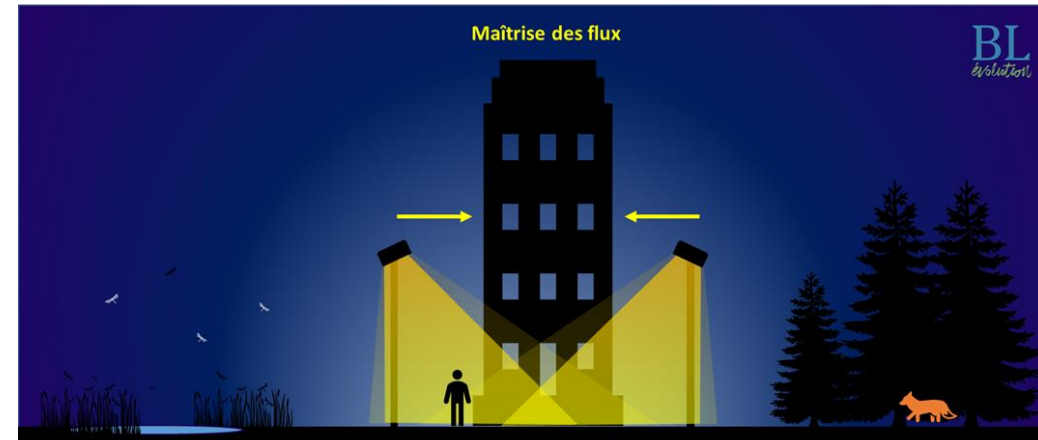
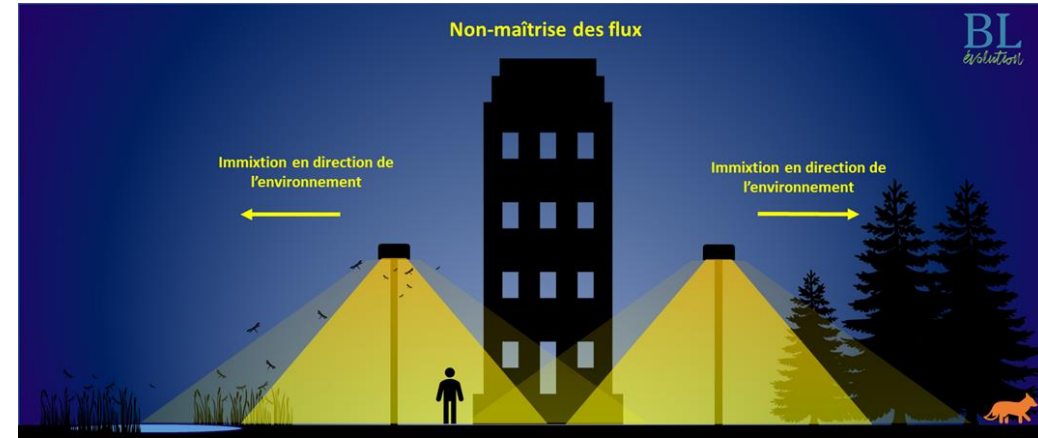
Eclairer en direction du sol



Planter des arbres pour limiter l'immixtion de lumière hors du périmètre du site

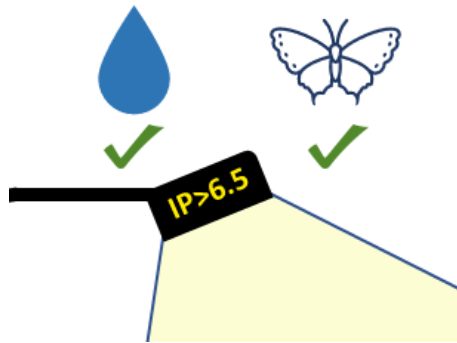


Eclairer uniquement à l'intérieur de l'enceinte

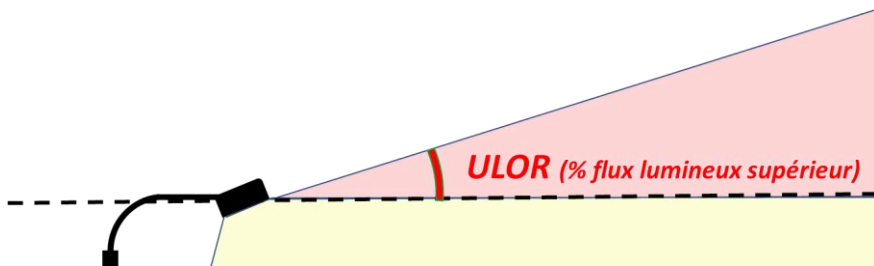


Préconisations techniques d'éclairage

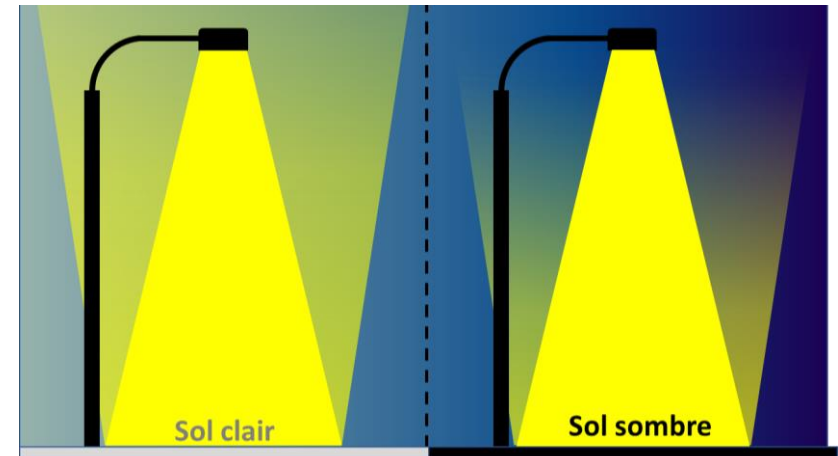
Utiliser un verre de protection lampadaire avec un indice de protection (IP) supérieur à 6.5 (résistant à l'infiltration d'eau, de poussières et donc d'insectes)



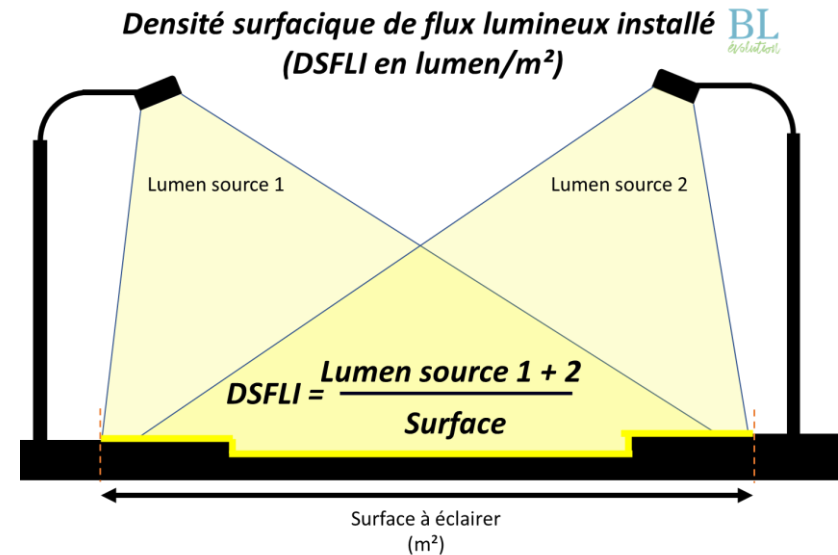
Utiliser un ULOR à 0%. Ce ratio est présent sur chaque fiche descriptive de tout lampadaire. Il exprime (en %) la fraction de flux émis vers le ciel par la source lumineuse (angle de flux total perdu par immixtion)



Couleur des sols : Une réflexion peut aussi être portée sur la composition du sol. Les sols urbanisés doivent être les plus sombres possibles pour limiter la réflexion de lumière en direction du ciel.

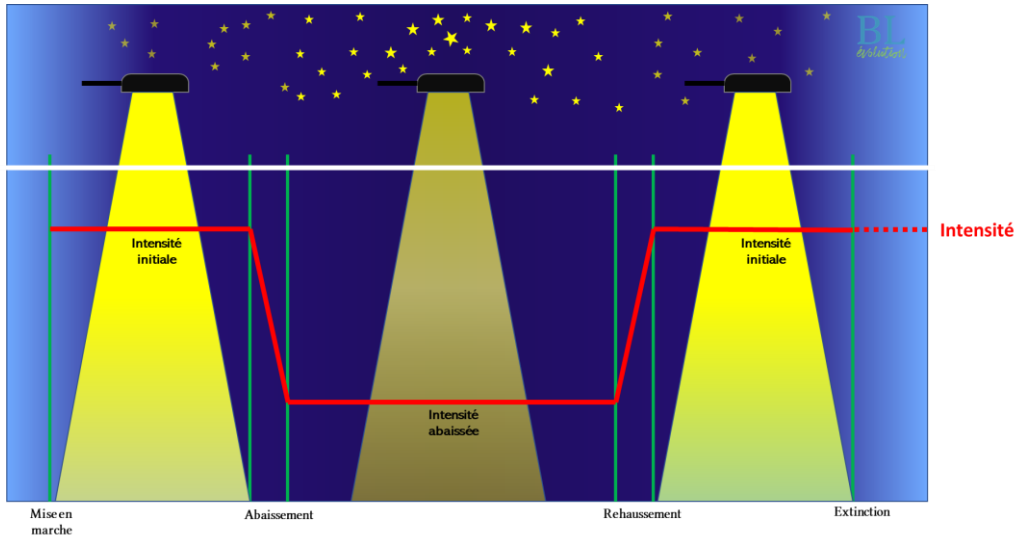


Limiter la densité surfacique de flux lumineux installé

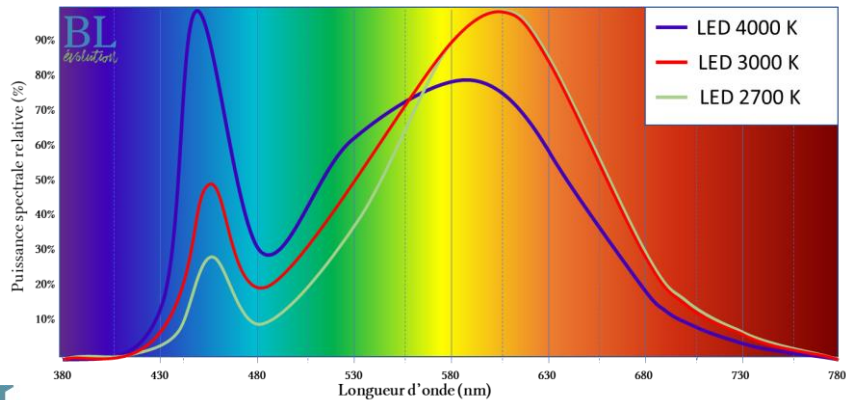


Préconisations techniques d'éclairage

Adapter l'intensité aux véritables besoins. Il est possible d'abaisser l'intensité au cours de la nuit pour limiter les impacts



Eviter la lumière bleue plus impactante en préférant des températures de couleurs inférieures ou égales à 2700K

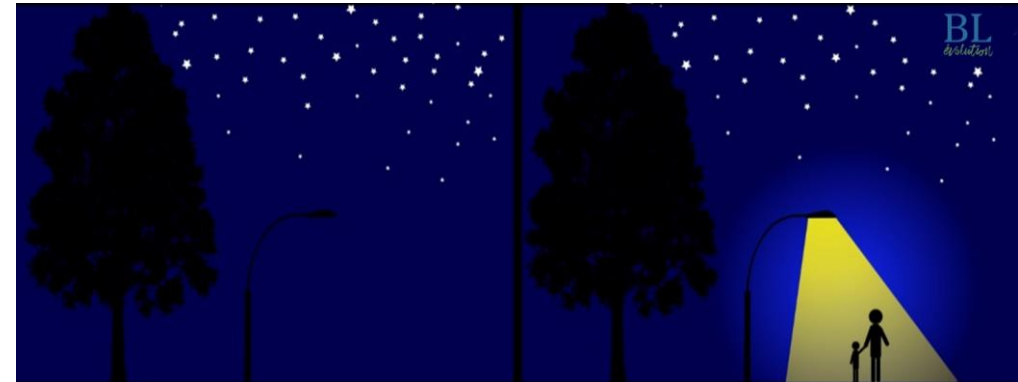


Limitier les puissances installées en portant attention aux meilleurs rendement lumineux

Exemples de rendements lumineux :

- Bougie = 0 à 1 lumen/Watt
- LED = 40 à 100 lumens/Watt
- Sodium Haute Pression = 80 à 200 lumens/Watt
- Sodium Basse Pression = 180 à 200 lumens/Watt
- Lampe Fluo-Compacte = 40 à 110 lumens/Watt
- Néon = 30 à 50 lumens/Watt
- Vapeur de Mercure = 50 à 70 lumens/Watt

Utiliser des détecteurs de présence pour répondre aux véritables besoins



Annexes

- M. Touzot., T. Lefébure., T. Lengagne., J. Secondi., A Dumet., L. Konecny-Dupré., P. Veber., V. Navratil., C. Duchamp., N. Mondy. 2021. Transcriptome-wide deregulation of gene expression by artificial light at night in tadpoles of common toads.
- Observed and Potential Effects of Artificial Night Lighting on Anuran Amphibians Bryant W. Buchanan
- The impact of clouds on the brightness of the night sky, Tomasz Ścieżor. 2020.
- Impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité. Synthèse bibliographique, JP Sibley 2008
- Lutter contre la pollution lumineuse: trois processus de valorisation de l'obscurité dans les territoires français, D Lapostolle, S Challéat - Vertigo, 2019
- Pollution lumineuse et trame verte et bleue: vers une trame noire en France?, R. Sordello, 2017
- Rapport 21-10. Pollution lumineuse et santé publique, JL Dufier, Y Touitou - Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine, 2021

Méthodologie et interprétation

La modélisation du halo lumineux, ou citée pollution lumineuse indirecte, correspond donc à la retranscription des données de qualité d'obscurité mesurées directement sur le terrain. La méthode consiste à établir une interpolation de surface à partir de données ponctuelles mesurées. Ce modèle intègre un coefficient de diffusion de la lumière dans l'atmosphère (issu du modèle simplifié de Dan M. Duriscoe qui a permis notamment la réalisation de l'atlas mondial).

Une méthode permettant de définir des données entre les points de mesures tenant compte de l'influence (poids) des points adjacents. En utilisant des données mesurées, nous obtenons une précision nettement supérieure par rapport à l'atlas qui est valable pour de grandes échelles.



La phase de collecte, directement effectuée sur le terrain, s'intéresse à deux types de données :

- La lumière : cherchant à caractériser les sources présentes au sein du périmètre d'étude et définir les paramètres des flux lumineux et des éclairages. Ce qui peut être caractérisé par la pollution lumineuse directe
- L'obscurité : cherchant à analyser la qualité globale de l'obscurité à l'intérieur du périmètre, et d'ainsi caractériser les halos lumineux à proximité, pouvant être définis comme de la pollution lumineuse indirecte

Les méthodes utilisées pour l'analyse de la pollution lumineuse directe :

Pointage des points lumineux

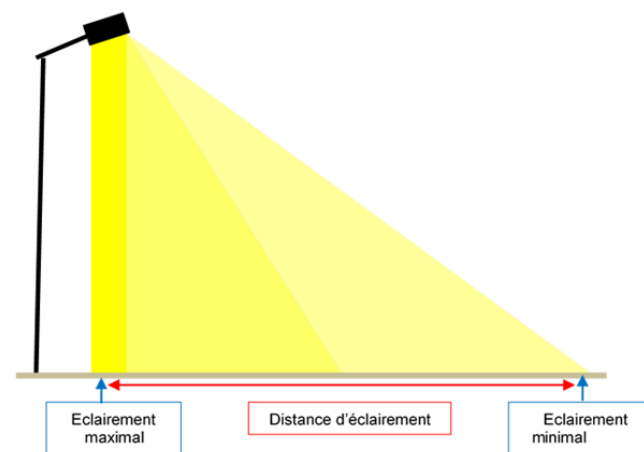
L'objectif de cette phase est de recenser l'ensemble des points lumineux au sein du périmètre et de les localiser grâce à un GPS afin de faciliter la modélisation. Seuls les éclairages du domaine public ont fait l'objet d'une analyse

Mesures d'éclairage

Les mesures d'éclairage sont réalisées grâce à un luxmètre. Un luxmètre est un appareil de mesure composé d'un capteur et d'un boîtier de commande. Le capteur est une lentille qui va permettre de mesurer la quantité d'éclairage réel émise par une source à un endroit précis. Cette quantité est alors traduite par le boîtier en nombre de lux (unité d'éclairage lumineux). La mesure est réalisée avec le capteur au niveau du sol, sans obstructions entre la mesure et la source.

Pour chaque source lumineuse nous avons effectué plusieurs mesures afin de qualifier l'éclairage émis :

- **Éclairage max** : l'éclairage maximal permet de connaître la plus grande quantité possible émise au sol par un point lumineux. Cette mesure est réalisée généralement (selon les types de lampadaires) au point le plus proche de la source.
- **Distance d'éclairage** : permet de mesurer la distance maximale sur laquelle une source lumineuse va avoir un impact. Pour cela, nous cherchons l'éclairage minimal (soit 0,1 lx d'ambiance lumineuse +0,1 lx dû à la source d'éclairage) au sol émis par une source, puis nous mesurons la distance (en mètres) entre cette mesure et le point lumineux



Analyse des lampadaires

Nous effectuons une collecte des caractéristiques des lampadaires et des paramètres sources de pollution lumineuse. Il s'agit d'observations sur la couleur du flux, la hauteur des lampadaires et l'ULOR



Les méthodes utilisées pour les mesures de qualité du ciel

Nous effectuons, sur des points pré-identifiés, une prise de mesure de la qualité de l'obscurité du ciel à partir d'un Sky Quality Meter (SQM). Cet appareil permet de comprendre le halo lumineux sur le périmètre d'étude et d'ainsi caractériser la qualité de l'obscurité initiale et de comprendre l'influence des zones urbaines alentours. (voir annexe suivante sur la présentation des outils).

Deux types de SQM ont été utilisés :

- Un SQM « classique » : qui permet la prise de mesure ponctuelle à un instant T. Plusieurs mesures couvrant le périmètre d'étude sont nécessaires et effectuées tout au long de la nuit.
- Un SQM LU-DL : le SQM LU DL (ou Data Logger) est un SQM installé à un point fixe durant toute la campagne de mesure. Il permet une prise longue (point de mesure toutes les 10 mn). Cette dernière mesure permet de calibrer l'ensemble des mesures afin d'éviter de possibles artefacts survenus au cours de la prise de mesures (passages nuageux).
 - Attention : la prise de mesure longue peut connaître certaines difficultés, notamment lors des nuits d'hiver où une couche de gel vient obstruer le capteur.

Modalité de la campagne de mesures et ajustement des données

Les mesures sont effectuées une seule et même nuit. La nuit est sélectionnée en fonction de plusieurs paramètres :

- **L'absence de lune.** La lune, qui reflète la lumière du soleil, est à l'origine de la création d'une ambiance lumineuse plus ou moins forte en fonction de la phase (premier croissant, premier quartier, pleine lune...). La lumière naturelle de la lune joue un rôle sur la qualité de l'obscurité d'un environnement nocturne. C'est pourquoi, de nombreuses espèces ont un comportement différent en présence de la lune, notamment au cours des périodes se rapprochant de la pleine lune. La présence de la lumière de la lune est captée par les instruments de mesures SQM, c'est pourquoi nous privilégions une nuit la plus proche de la nouvelle lune.
- **Une nuit avec pas (ou peu) de nuages.** Les nuages agissent la nuit comme une barrière à la diffusion de la lumière. Ainsi, les halos lumineux issus des agglomérations urbaines proches ou éloignées peuvent être reflétés par les nuages et influencer le périmètre d'étude, ce qui peut perturber la prise de mesure.

Si la météo n'a pas été clémente lors de la prise de mesure, nous appliquons un ajustement des données pour être au plus proche de la réalité du terrain. Pour cela nous appliquons un réajustement par les mesures du SQM LU DL à prise longue. Si les données ne sont pas exploitables, nous opérons un ajustement à partir des données satellites (cela implique néanmoins une perte de précision mais qui reste faible).



Outils utilisés :

Les outils pour la collecte des données :

Un GPS portable : il s'agit d'un GPS (type randonnée) qui va permettre de géolocaliser le point de mesure SQM afin de définir l'emplacement exact du point et de faciliter la retranscription sur le logiciel SIG. Il permettra de s'assurer de la réussite de la collecte mais aussi de la sécurité de l'opérateur durant les campagnes.

Un SQM (Sky Quality Meter) : un instrument de mesure de la qualité de l'obscurité du ciel. Utilisé par les astronomes, le SQM permet d'identifier les meilleures conditions pour l'observation. L'appareil mesure la brillance du ciel (luminance) par un capteur sensible à la lumière, (où les infrarouges sont exclus grâce à un filtre) moyennée sur une zone de ciel correspondant à la projection d'un cône. Il permet d'obtenir des données en magnitude/arc-second² (mag/arcsec²). C'est-à-dire qu'il permet de mesurer la magnitude par arc seconde au carré dans une zone du ciel, soit la noirceur du ciel. Plus concrètement, l'appareil mesure la noirceur du fond du ciel en une place P et en un instant T selon un cône de 120°. La mesure se fait au zénith pour éviter les perturbations potentielles de l'horizons qui pourrait entrer dans le champ du cône de mesure (nécessite aussi un espace ouvert). Les valeurs sont comprises entre 16,00 (ciel très pollué) et 23,00 mag/arcsec² (ciel avec une obscurité exceptionnelle).

La version LU-DL du SQM permet un enregistrement du halo lumineux sur l'ensemble de la nuit, permettant ainsi de contrecarrer les possibles artefacts de mesure (nuage/lune/événements particuliers...) et d'ajuster notre modèle.

Un luxmètre : le luxmètre est un appareil qui permet de mesurer le niveau d'éclairement d'une source lumineuse. Il va permettre d'identifier le niveau d'éclairement des sources lumineuses qui sont déjà présentes à l'état initial au sein du périmètre (ou à proximité) et de caractériser les flux lumineux.



Modélisation de la pollution lumineuse indirecte, sans réajustement

Carte de la modélisation de l'obscurité sans réajustement pour ôter les nuages de l'équation

