



ETUDE POLLUTION LUMINEUSE

Site de Bernes-sur-Oise

Contact :

Rémy OSELLO

Chef de projet

remy.osello@bl-evolution.com



Version	Date
Version initiale	Mai 2023
Version 1 : modification de périmètre	Juin 2023
Version 2 : ajout d'un nouveau scénario avec les hauteurs de bâtiments	Octobre 2023
Version 3 : ajout du chemin du Crouy	Octobre 2023

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 51

Page 53

Simulation de la pollution lumineuse du futur projet

Page 54

- Modélisations prédictives
- Conclusions sur les simulations des projets

Page 55

Page 64

Les effets probables du projet

Page 65

- Etude des impacts du projet
- Synthèse des impacts du projet
- Les mesures correctrices

Page 66

Page 76

Page 78

Conclusion non-technique

Page 84

Préconisations générales

Page 86

Annexes

Page 90

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'espèces. La réponse de la biodiversité est moins marquée pour les longueurs d'ondes les plus longues (rouge, orange, jaune).

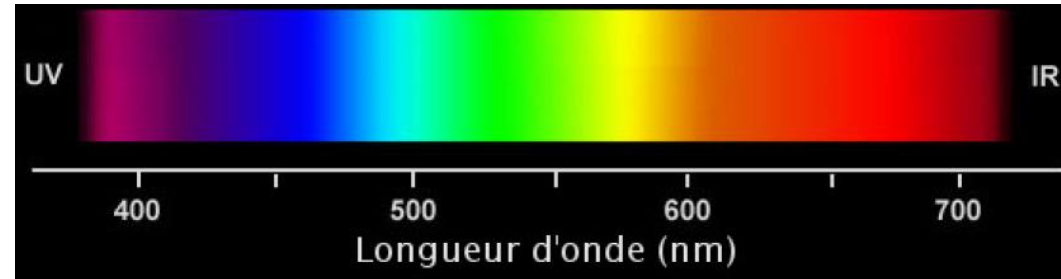
Si la majorité des taxons sont sensibles aux courtes longueurs d'ondes, il est cependant important de noter que la réponse des espèces n'est pas uniforme à cette question de couleur de flux. Certaines sont plus sensibles aux couleurs chaudes qu'aux couleurs froides. Pour cela, un tableau par taxon a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



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 :

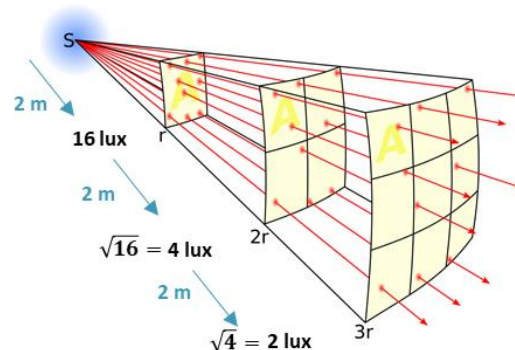
Les principales données utilisées pour comprendre la pollution directe sont le flux lumineux et l'éclairement.

- **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 m^2). L'unité de l'éclairement est le **lux**. Un lux est donc :

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

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**

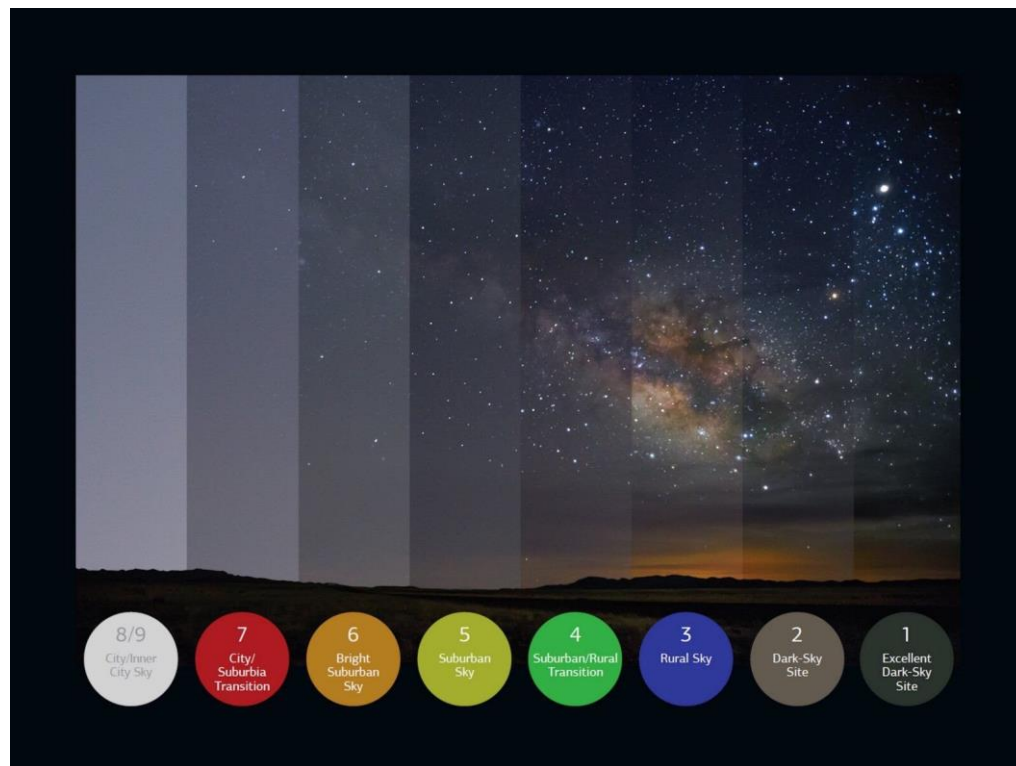
* A noter que lorsqu'on parle de grandeur photométrique cela implique une donnée ou une mesure qui est issue d'un ressenti par la vision **humaine**. Il s'agit donc d'une sensation visuelle de l'œil humain. Les ressentis de la faune peuvent être différents, mais ne peuvent être estimés.



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.

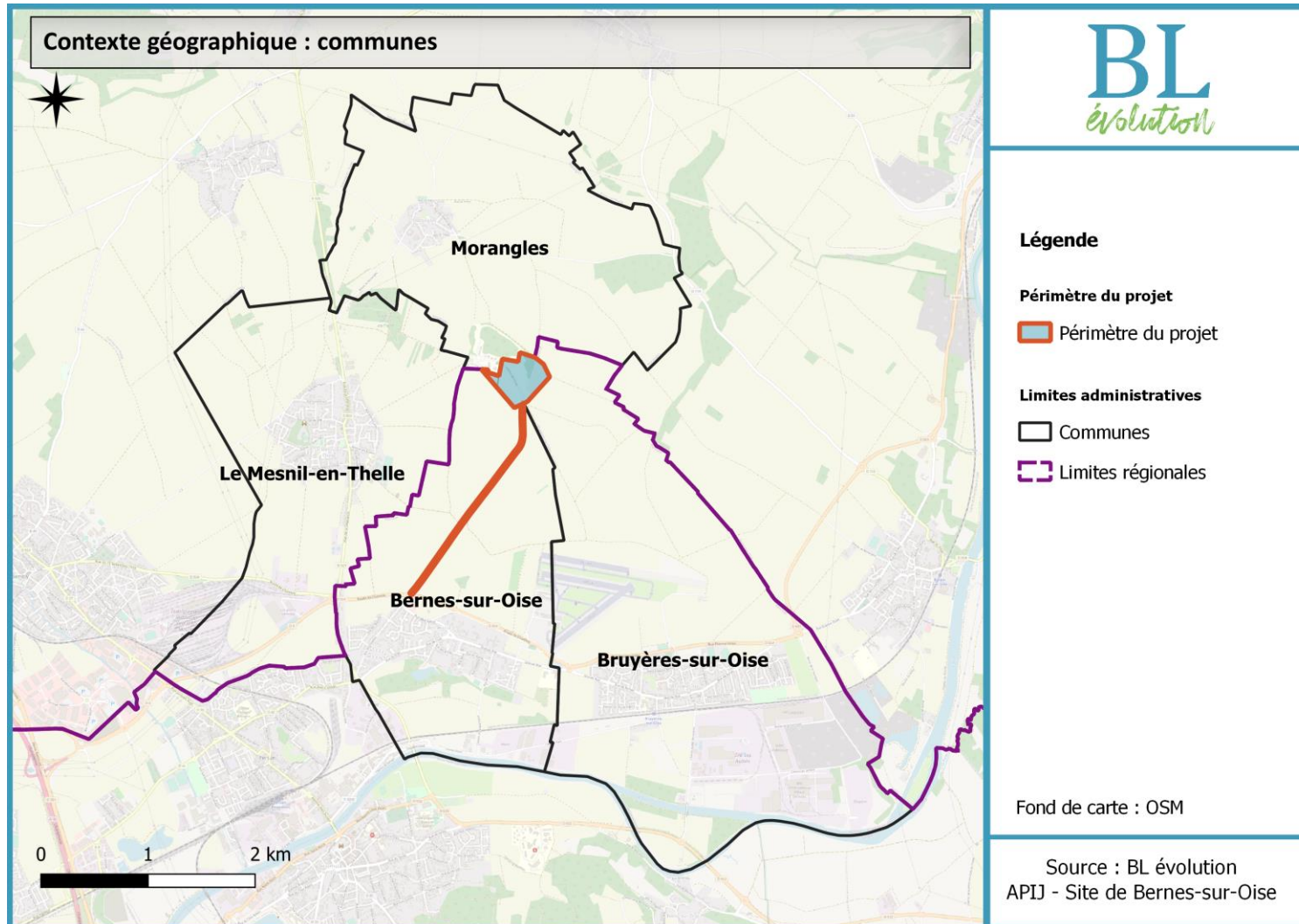
Pour rendre compte de cette implication, une échelle est proposée et comparée avec des caractéristiques urbaines :



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

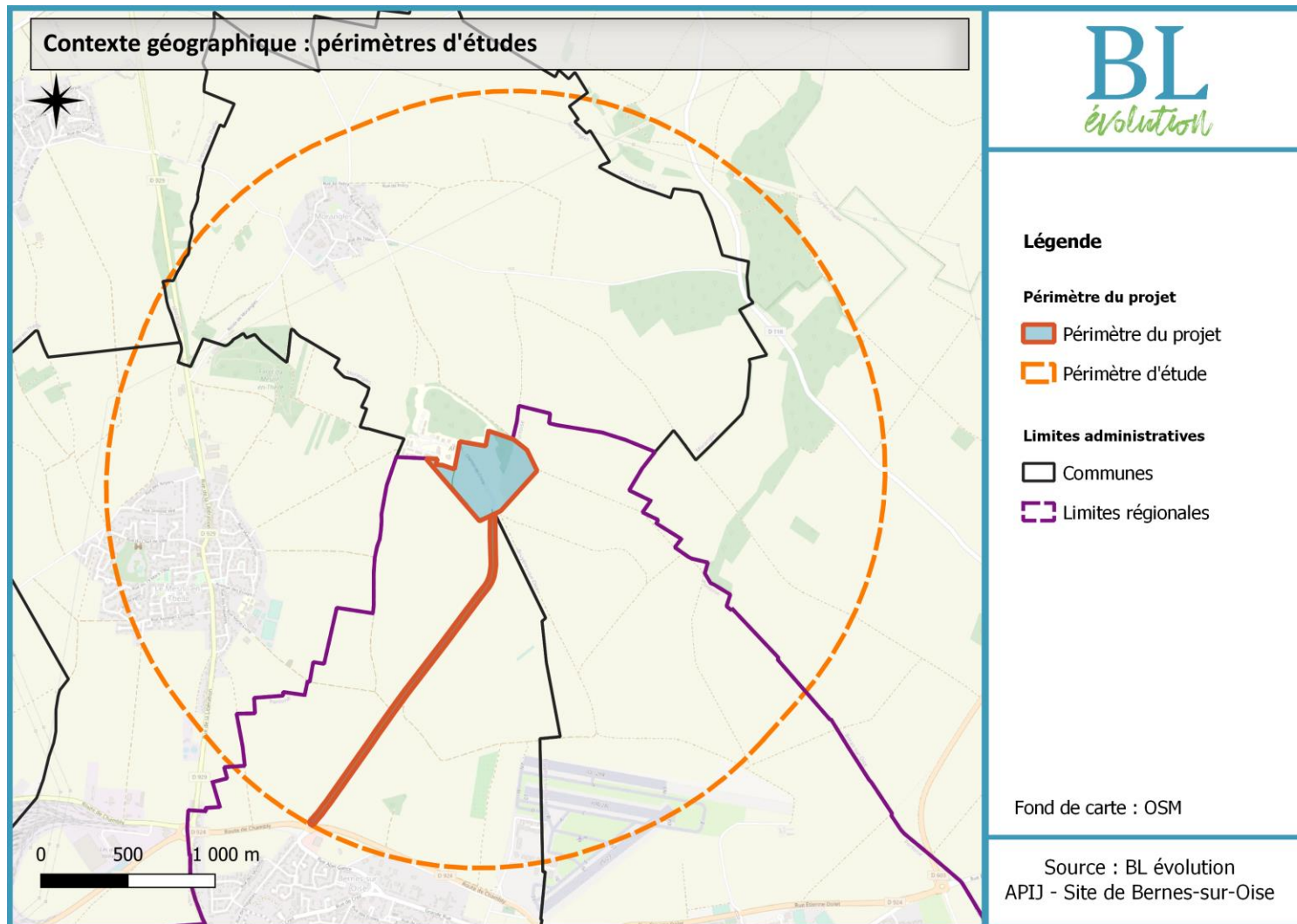
Contexte du site étudié



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 Bernes-sur-Oise. *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 sur la commune de Bernes-sur-Oise à la frontière avec la commune Bruyère-sur-Oise et celle de Morangles. Il est aussi sur la frontière entre les départements du Val d'Oise et celui de l'Oise, et par conséquent, au sein de la région Île-de-France à la frontière avec les Hauts-de-France.

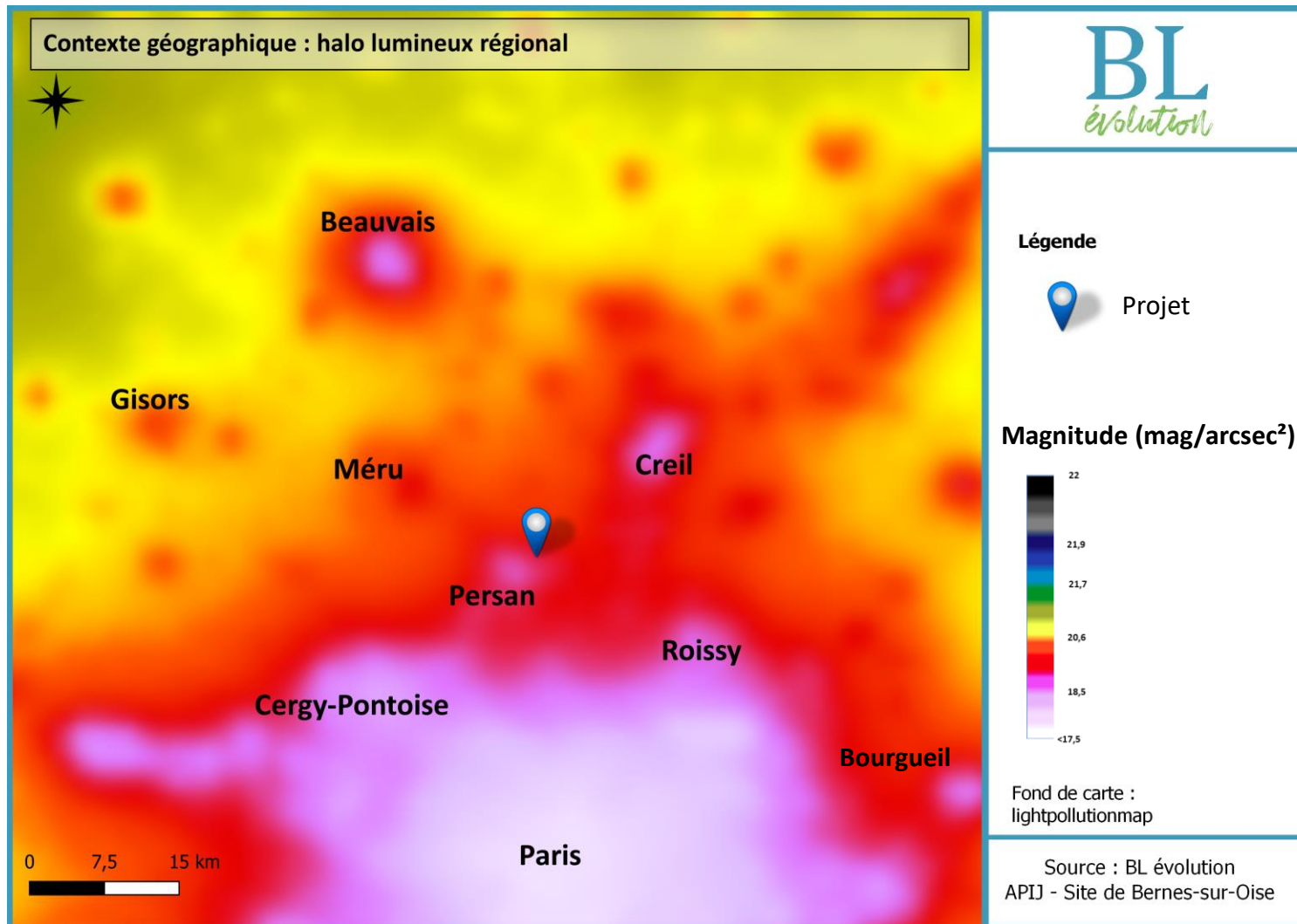
Définition des périmètres



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 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. *Le tracé est choisi pour prendre en compte des zones urbanisées à proximité.*

Compréhension du contexte lumineux régional



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.

Le projet se situe dans l'influence générale du halo lumineux global de l'agglomération parisienne. La très forte présence d'éclairage concentrée sur l'ensemble de la région crée un halo lumineux qui dépasse la ville de Paris. Ainsi, même les communes pouvant disposer de peu de sources lumineuses, celles-ci sont quand même touchées par une obscurité dégradée. C'est le cas du projet de Bernes-sur-Oise.

Localement, les éclairages de la ville de Persan sont perceptibles.

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, 43 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 de Bernes-sur-Oise).

6 sources lumineuses sont présentes directement à l'intérieur du périmètre du projet.


Parmi ces points lumineux, un seul type de lampadaire est identifié. Il s'agit d'éclairage de type voirie, et un seul type d'ampoule a été recensé :

- Des ampoules SHP.

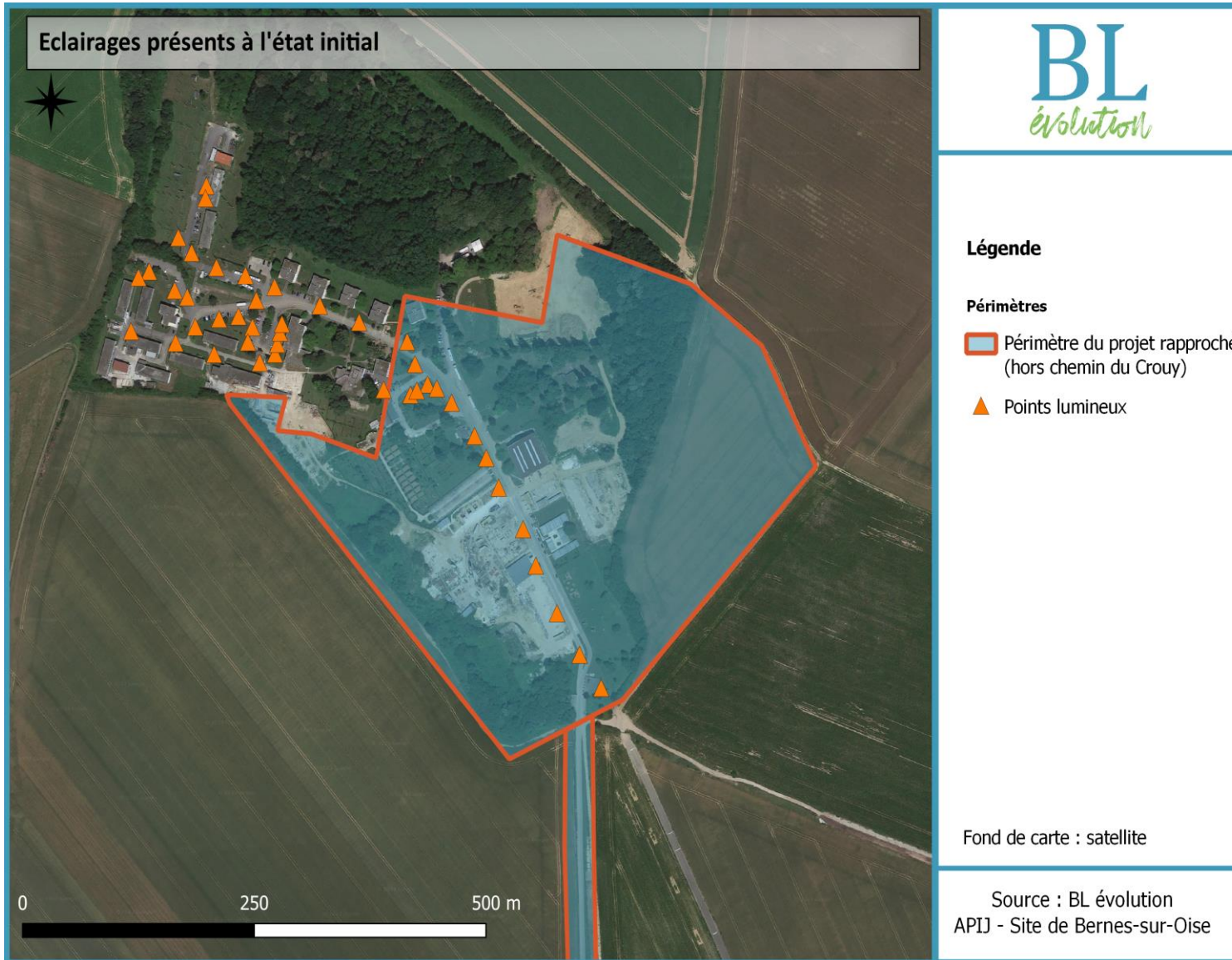
Aucun éclairage privé n'est présent à proximité du périmètre.

Types d'éclairages rencontrés

Il s'agit d'éclairage de type routier, avec une hauteur de 6 mètres et des ampoules de type sodium haute pression.

Eclairage voirie

Les éclairages de voirie sont des lampadaires classiques, avec une maîtrise des flux dépendant de la hauteur et une puissance variable.
43 sources identifiées de type SHP : <ul style="list-style-type: none">• Intensité faible• Hauteur moyenne (6m)• Lumière orange• ULOR <5%
Indice pollution lumineuse : faible

Présence de points lumineux à proximité du projet



Analyse des éclairages

Le Chemin du Crouy n'est pas prévu d'être éclairé, ainsi aucun éclairage n'a été scénarisé pour cette étude. Pour certaines analyses techniques, un zoom sur la zone d'étude a été appliqué (périmètre du projet rapproché)

La zone du centre de formation est éclairée par 43 sources lumineuses. Celles-ci sont réparties principalement le long de la route ou sur des parkings.

9 sources sont présentes à l'intérieur du 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 :

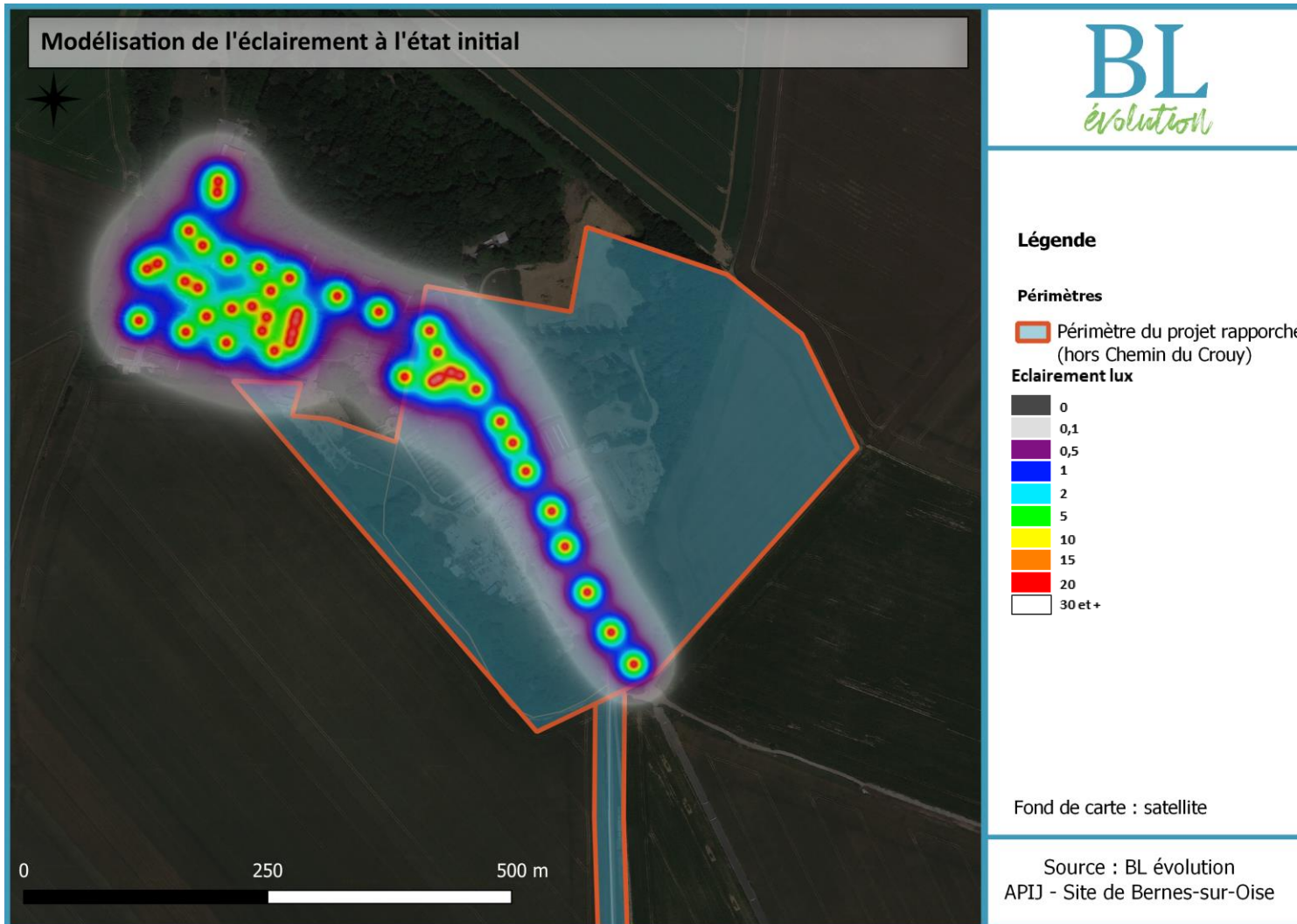
- Les sources lumineuses sont considérées lambertiennes. C'est-à-dire qu'il s'agit d'une source lumineuse dont la luminance est identique dans toutes les directions. Les possibles orientations des flux lumineux, qui nécessiteraient une exploration nettement plus importante (connaître la marque et le 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 nuls.

Cartographie de la pollution lumineuse directe à l'état initial



La modélisation de l'éclairage, dans le périmètre rapproché, montre que le projet de Bernes-sur-Oise dispose d'un éclairage déjà important et isolés par rapport aux communes aux alentours.

La présence d'éclairages à l'état initial sur le site monte une zone touchée par la pollution lumineuse directe. De plus, on notera un effet îlot d'éclairage au sein d'une zone particulièrement obscure.

Aucun éclairage n'est présent à l'état initial sur l'ensemble du Chemin du Crouy.

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 20 avril 2023. La collecte de données a démarré à partir de 21h30 et s'est terminée aux alentours de 3h00 du matin. La situation a été évolutive au cours de la nuit avec la présence de nuages en début de nuit. Ensuite, à partir de 22h30, le ciel était sans nuage. Une situation propice au mesure d'obscurité.

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

Situation de référence

Les données en début de nuit sont donc peu révélatrices de l'obscurité de la nuit du 20 avril, qui sert de référence à cette étude. La définition d'une situation de référence est donc nécessaire.

Pour définir cette situation, nous considérons la moyenne des données d'obscurité mesurée entre 22h30 et 2h45. Ainsi toutes les mesures ponctuelles réalisés avant cet horaire ont été modifiées.

La modification consiste ensuite à appliquer aux mesures ponctuelles, la même différence qu'il existe entre la situation mesurée et la situation de référence.

Par exemple, s'il existe une différence de -0,5 mag/arcsec² à 22h45, entre la situation mesurée et la situation de référence, la mesure ponctuelle faite à 22h45 est minimisée de 0,5 mag/arcsec².

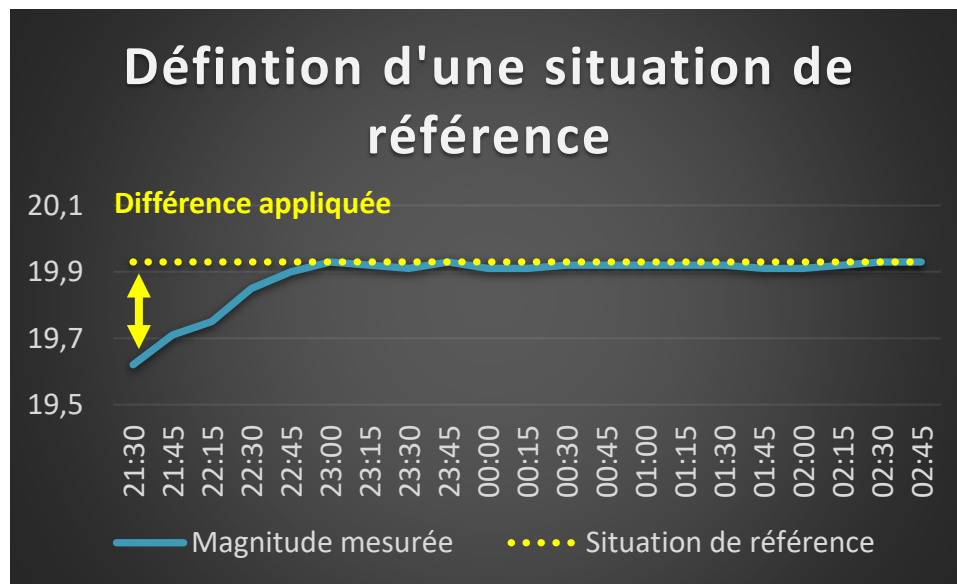
Cette modification permet de limiter l'impact des nuages survenus en début de nuit. Cela concerne 4 mesures.

A noter que la situation de référence définie pour cette étude est de 19,93 mag/arcsec².

Définition d'une situation de référence

Définition d'une situation de référence

Ainsi, le graphique ci-dessous présente les résultats des mesures continues prises la nuit du 20/04/2023, comparée avec la situation mesurée.

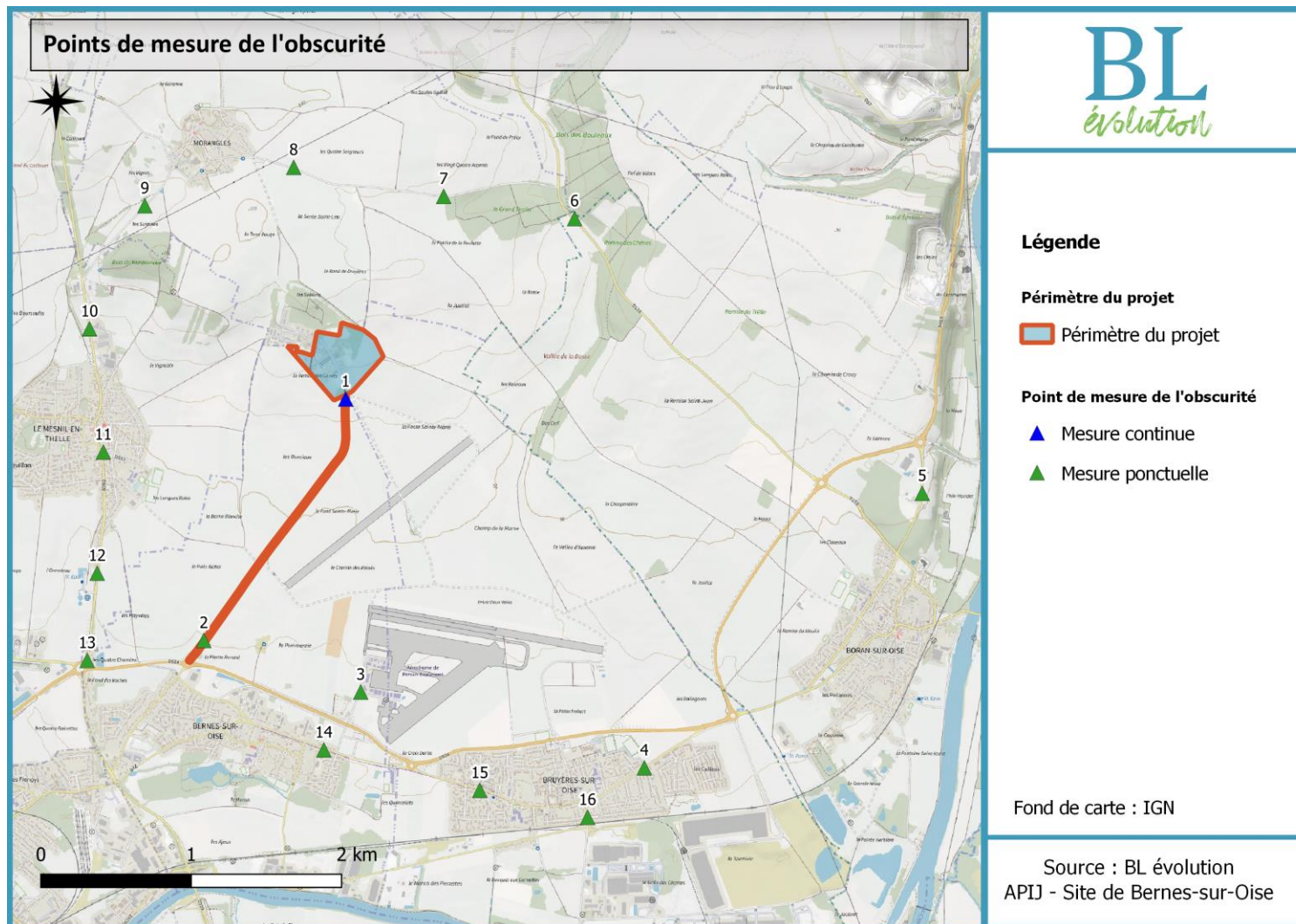


Application de la modification aux données mesurées ponctuellement.

ID	Valeurs brutes mesurées	Valeurs retenues
1 (situation de référence)	19,93	19,93
2	19,59	19,70
3	19,67	19,74
4	19,47	19,50
5	19,74	19,75
6	20,15	20,15
7	20,20	20,20
8	19,90	19,90
9	20,13	20,13
10	20,03	20,03
11	19,90	19,90
12	19,75	19,75
13	19,48	19,48
14	19,75	19,75
15	19,76	19,76
16	19,45	19,45

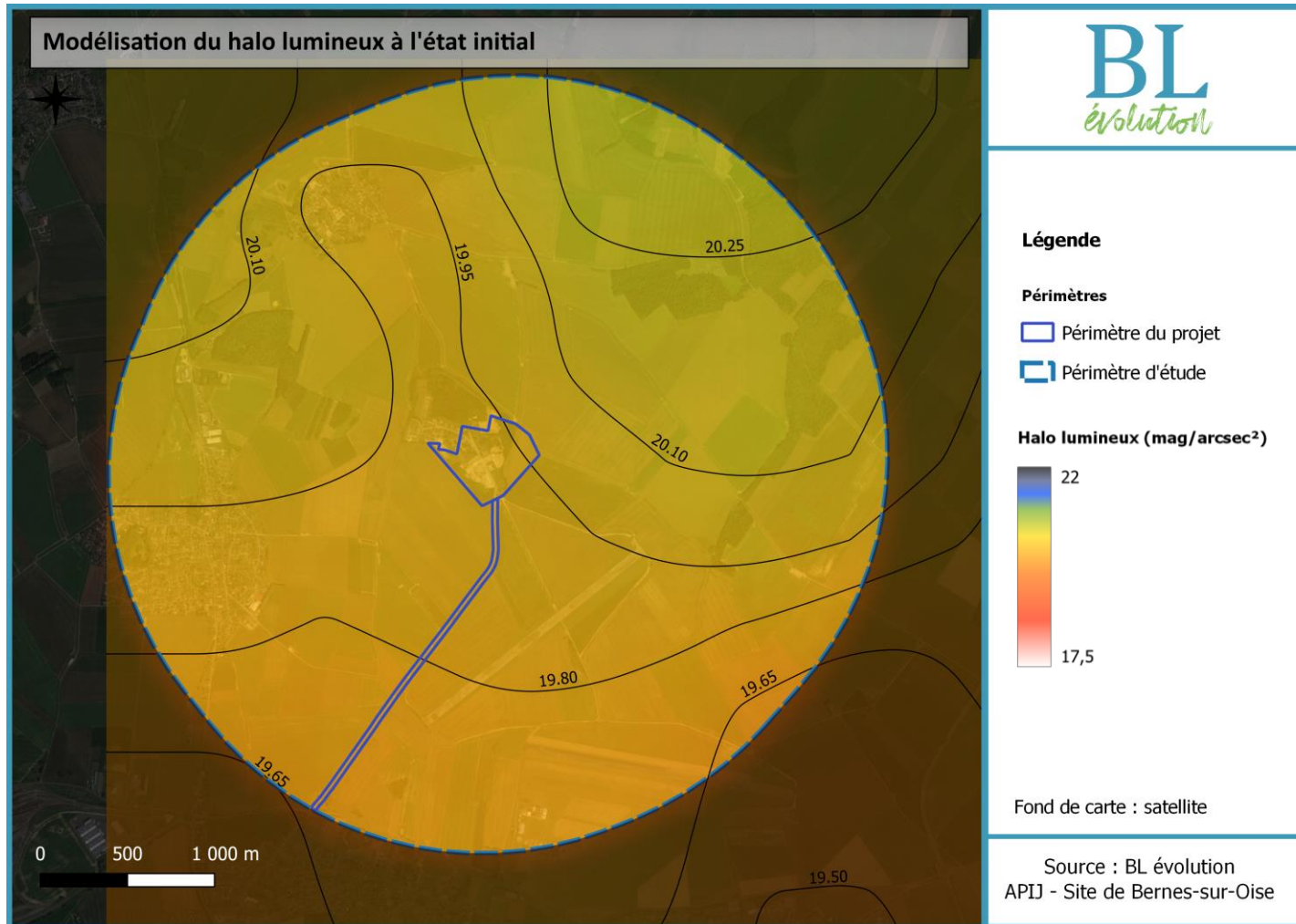
Modifications appliquées

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-est et 20,30 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 assez stable sur l'ensemble du territoire d'étude.

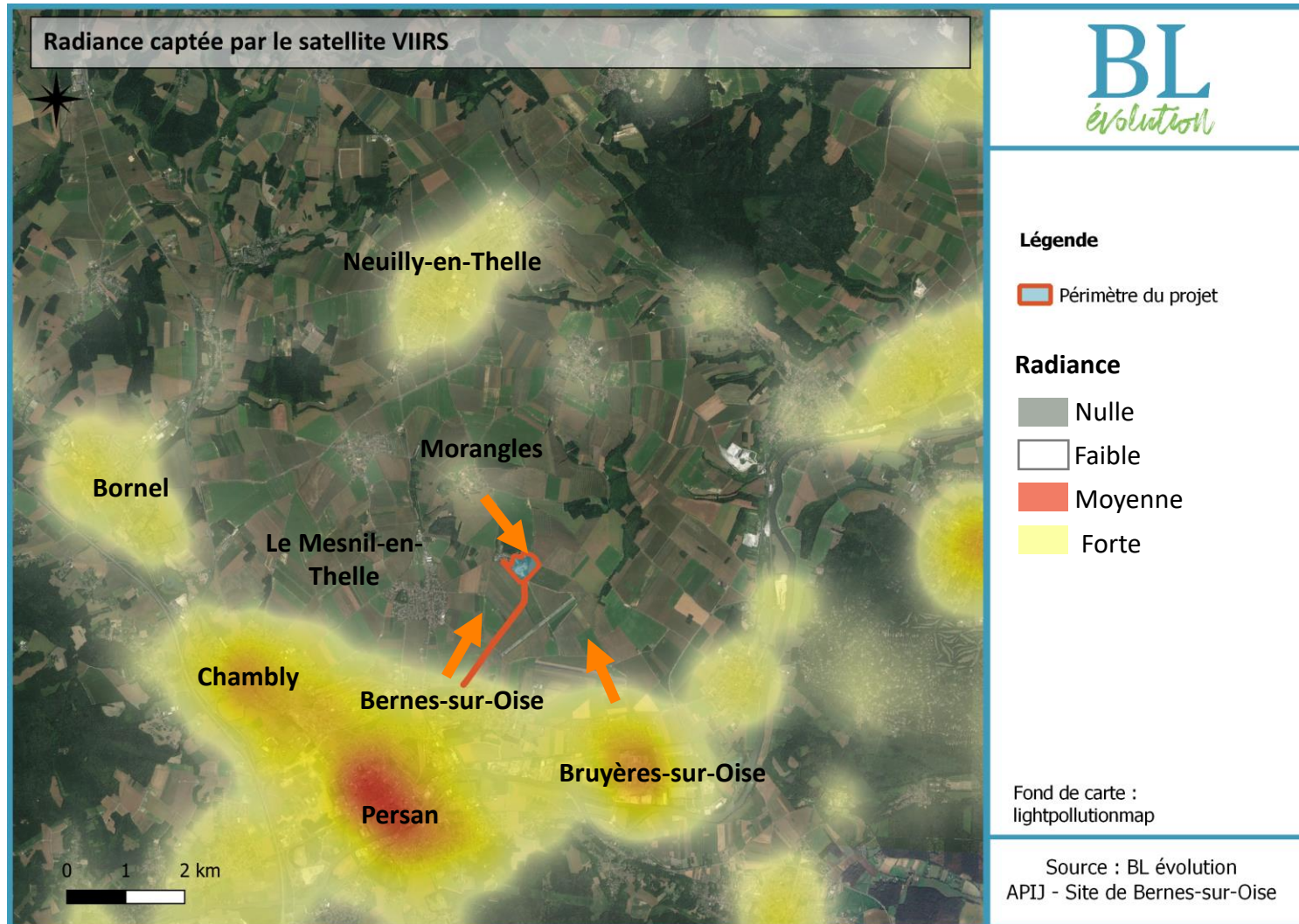
De légères perturbations sont perceptibles depuis les agglomérations urbaines de Bernes-sur-Oise/Persan/Chambly au sud-ouest ; et une influence certaine de Bruyères-sur-Oise au sud-est.

Les villages de Morangles et du Mesnil-en-Thelle sont très peu perceptibles.

La principale raison d'une obscurité dégradée, marquée par sa stabilité, vient d'une influence globale et générale de l'agglomération Île-de-France qui joue un rôle sur plusieurs dizaines de kilomètres au-delà des espaces très urbanisés.

On retiendra que la **qualité de l'obscurité est plutôt dégradée** sur le territoire d'étude, avec une stabilité globale.

Modélisation de la pollution lumineuse indirecte



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 de lumière artificielle la nuit 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 de Persan. Les communes de Morangles et du Mesnil-en-Thelle ont une légère influence visible sur les données satellites et identifiée par les mesures sur place.

Les principales sources d'altération de l'obscurité qui sont proches restent assez faibles. La dégradation majeure s'explique par le **halo lumineux global parisien**.

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 dérangeante 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 soupçonnent 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 Aliséa, dont la version finale (Juillet 2023) a été transmise à BL évolution, pour la réalisation de faune/flore. L'état initial des milieux naturels a été mené sur

- La faune ;
- La flore ;
- Les habitats ;
- Une analyse des fonctionnalités écologiques à l'échelle locale ;
- Une identification des enjeux écologiques et des implications réglementaires

Les relevés confiés à Alisea concernent les groupes suivants : Habitats et flore, Avifaune, Mammifères terrestres, Mammifères volants (Chiroptères), Reptiles, Amphibiens, et Insectes.

Les données proviennent de la bibliographie et des relevés réalisés par Alisea.

Un rapport est transmis pour les études faune/flore et habitats. Version finale juillet 2023.

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).

A noter que si un enjeu est nul, dans l'une ou l'autre partie, les enjeux sont considérés nuls.

Niveau d'enjeu pollution lumineuse

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

Niveau d'enjeu étude écologique fournie (Aliséa)

Echelle retenue :

Très fort
Fort
Modéré
Faible
Très faible
Nul

Flore

Rapports d'inventaires écologiques :

Les habitats recensés sont banals et anthropiques. 158 espèces végétales ont été notées. Aucune d'entre-elles n'est protégée ni ne représente un enjeu de conservation.

Seules l'Œillet velu et la Sauge des prés, espèces à mettre en avant, représentent un léger enjeu en région Haute Normandie. Les enjeux habitats et flores apparaissent comme faibles de manière générale à assez faible/modéré sur et aux abords du chemin ou pousse l'Œillet velu. 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 présentes.

Enjeu de l'étude écologique faible.

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 très faible.

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

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

Avifaune

Rapports d'inventaires écologiques :

Au total, ont été recensées pendant les inventaires de terrain :

- 48 espèces en période de nidification, dont 36 sont protégées et 18 présentant des enjeux de conservation.
- 34 espèces en période de migration, dont 25 sont protégées mais aucune présentant des enjeux de conservation.
- 32 espèces en période d'hivernage, dont 21 sont protégées et 2 présentant des enjeux de conservation.

Le périmètre d'étude est un îlot de biodiversité au milieu de parcelles agricoles et il existe peu de corridors permettant de relier le site à d'autres espaces naturels.

Les enjeux concernent principalement les haies denses autour du périmètre d'étude qui abritent des espèces à enjeux de conservation et le petit boisement qui abritent des espèces à enjeux réglementaires. L'ourlet prairial et les quelques bouts de haies long du chemin de Crouy offrent également un refuge pour des espèces d'oiseaux de plaine, dont certaines ont de forts enjeux de conservation.

Enjeu de l'étude écologique : faible à fort (nidification)

Mise en perspective de la pollution lumineuse :

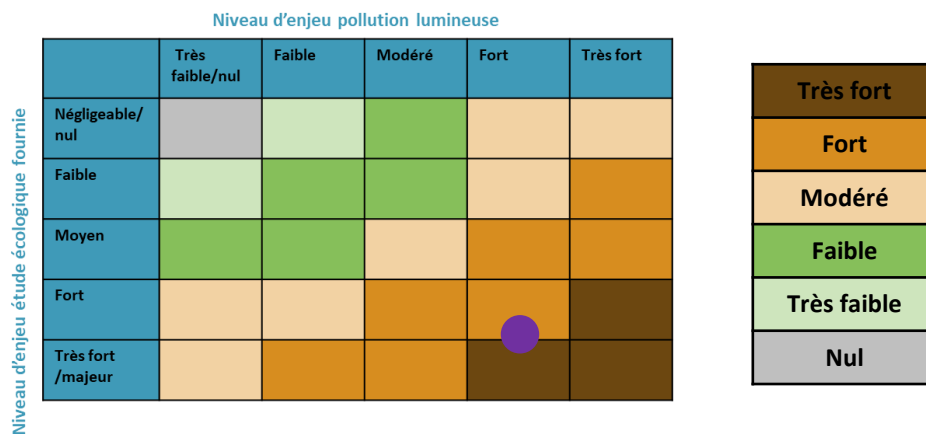
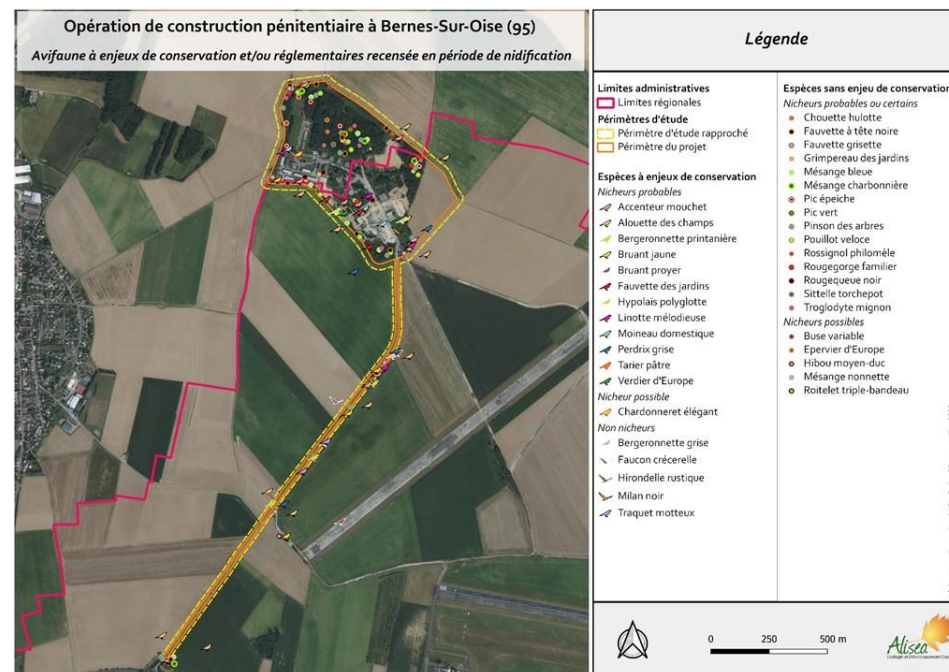
La mise en lumière pourra avoir des effets sur les nichages des oiseaux (diurne comme nocturne), limitant/reculant la présence de nid au-delà des zones recevant directement des flux lumineux.

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

BL ■ Enjeu retenu sur une mise en lumière : fort.

Cartographie de l'étude écologique :



Forts à très forts en période de nidification

Faibles en période de migration

Faibles en période d'hivernage

Evaluation des enjeux : mammifères terrestres

Mammifères (hors chiroptères)

Rapport d'inventaire écologique :

Les espèces recensées sont communes en Ile-de-France et capables de s'adapter à différents milieux.

Une espèce est protégée.

Les enjeux concernant les mammifères terrestres sont faibles.

Mise en perspective de la pollution lumineuse :

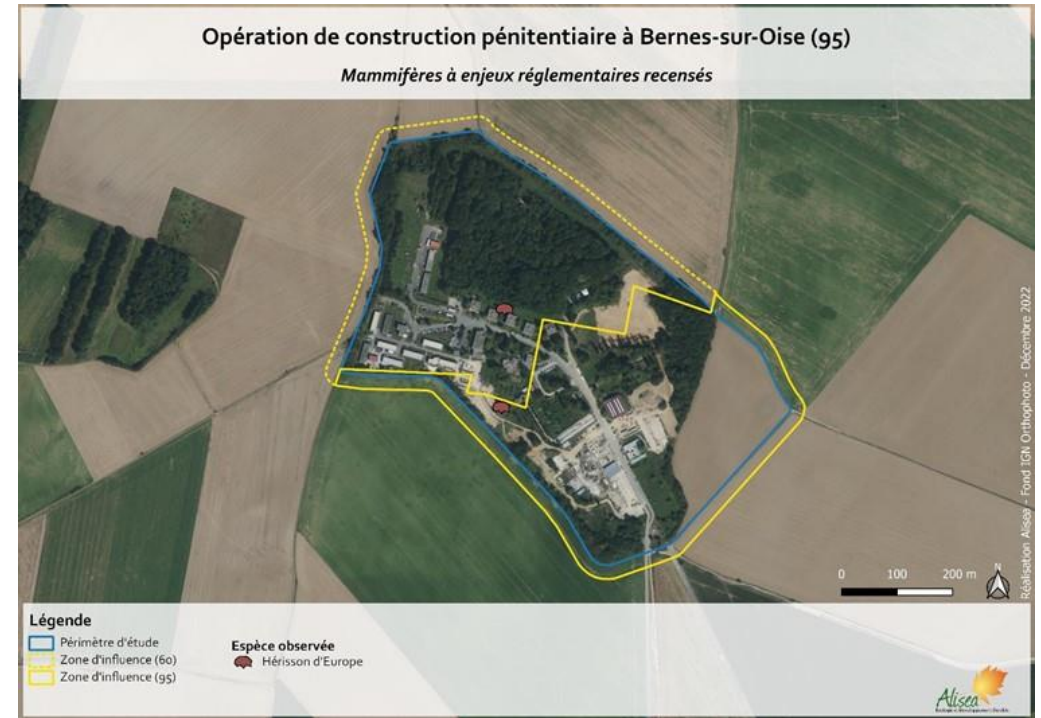
La mise en lumière peut être gênante pour les espèces qui vivent en partie la nuit.

Le hérisson est une espèce majoritairement nocturne mais peu sensible à une mise en lumière.

Enjeu de pollution lumineuse : faible

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

Cartographie de l'étude écologique :



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

Chiroptères

Rapport d'inventaire écologique :

Au total, 7 espèces ont été recensées au cours des inventaires, toutes protégées et 4 présentant des enjeux de conservation.

Des potentialités de gîtes existent dans le bois ou dans le bâti du site de l'AFPA. Les milieux sont également utilisés comme lieu de chasse.

Le chemin de Crouy est moins favorable à la présence de chiroptères. Les quelques secteurs de haies sont les seuls endroits attirant les chauves-souris.

Sur la base des inventaires de terrains, les enjeux concernant les mammifères volants semblent forts.

Enjeu de l'étude écologique : fort

Mise en perspective de la pollution lumineuse :

Les pipistrelles communes semblent plus adaptées à la lumière et chassent sous les lampadaires, néanmoins, elles sont moins présentes en milieux éclairés. D'autres espèces, comme les murins, les sérotines ou les noctules sont particulièrement sensibles à la pollution lumineuse.

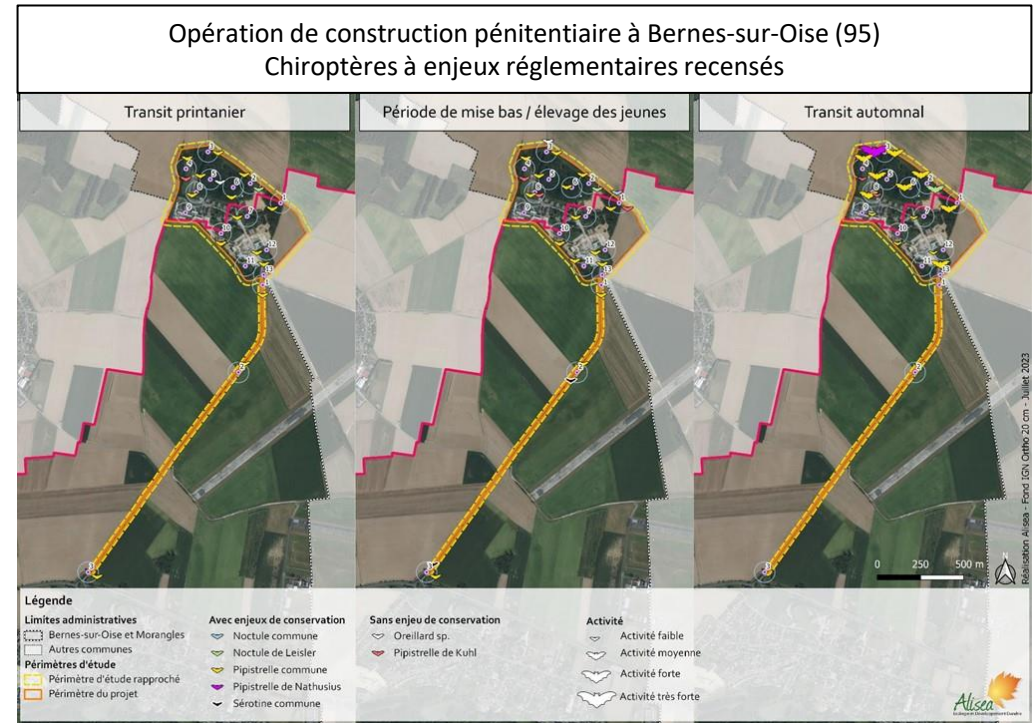
Il existe des potentialités de gîtes importantes au niveau des boisements les plus matures et de certaines anfractuosités au niveau des bâtiments (bien que cela reste limité compte-tenu de la typologie des constructions).

La mise en lumière pourra fortement perturber ces espèces.

Enjeu de pollution lumineuse : très fort

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

Cartographie de l'étude écologique :



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

Evaluation des enjeux : reptiles

Reptiles

Rapport d'inventaire écologique :

Une seule espèce a été recensée, le lézard des murailles, qui est commune et non menacée. Elle est protégée au niveau national.

Les enjeux concernant les reptiles sont faibles

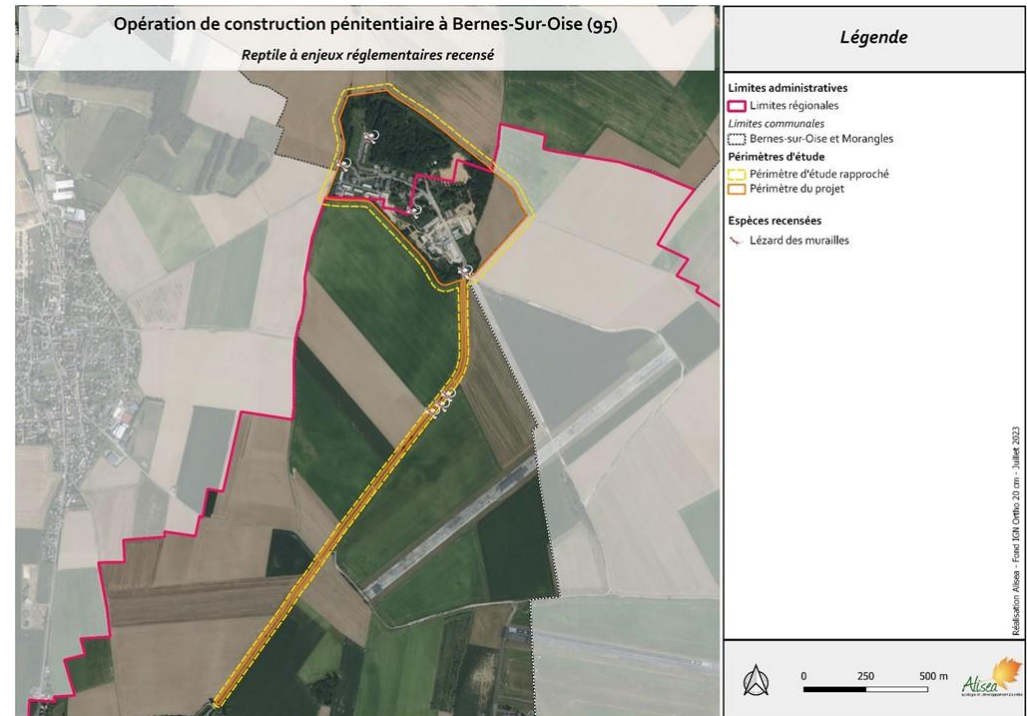
Mise en perspective de la pollution lumineuse :

La pollution lumineuse présente peu d'enjeux 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 : très faible

Cartographie de l'étude écologique :



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 : amphibiens

Amphibiens

Rapport d'inventaire écologique :

Aucune espèce n'a été observée. Les milieux ne sont pas favorables pour la reproduction et le site de l'AFPA semble assez isolé pour pouvoir attirer des individus en hibernation.

Les enjeux concernant les amphibiens sont nuls.

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 lumière. Néanmoins aucune espèce n'est présente et aucun habitat favorable n'a été identifié

Enjeu de pollution lumineuse (sans habitat favorable) : nul

- **Enjeu retenu sur une mise en lumière : nul**

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

Insectes

Rapport d'inventaire écologique :

Au total, 62 espèces d'insectes ont été recensées au sein des deux périmètres d'étude. Pour tous les groupes, il s'agit d'espèces peu communes à très communes. Cinq d'entre-elles présentent des enjeux de conservation.

Leur présence est liée aux espaces herbacés non entretenus et aux lisières buissonnantes des boisements. Le contexte très agricole autour de l'AFPA renforce l'intérêt de ces habitats qui permettent le maintien de ces espèces.

La Chênaie-frênaie dégradée pourrait présenter des enjeux concernant les coléoptères saproxyliques. Le chemin de Crouy est longé par un ourlet plus ou moins nitrophile selon les secteurs et qui permet aux insectes de trouver refuge dans une zone entièrement agricole.

Les enjeux sont faibles et une attention particulière peut être donnée quant à la conservation d'habitats favorables au maintien d'une telle diversité.

Enjeux retenus par le rapport écologique sont faibles.

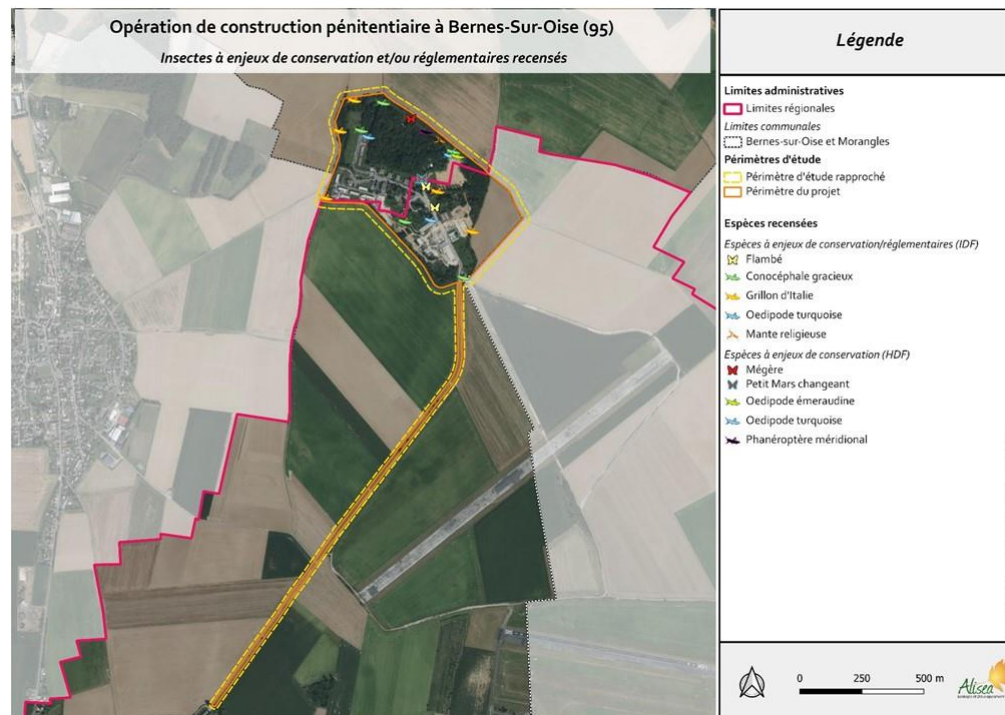
Mise en perspective de la pollution lumineuse :

A noter qu'aucun inventaire nocturne n'a été mené. 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 proches des périmètres mais aussi les espèces qui peuvent être éloignées et qui pourront être attirées à plusieurs dizaines de mètres.

Enjeu de pollution lumineuse : très fort

- Enjeu retenu sur une mise en lumière : fort.
APIJ : site Bernes-sur-Oise

Cartographie de l'étude écologique :



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

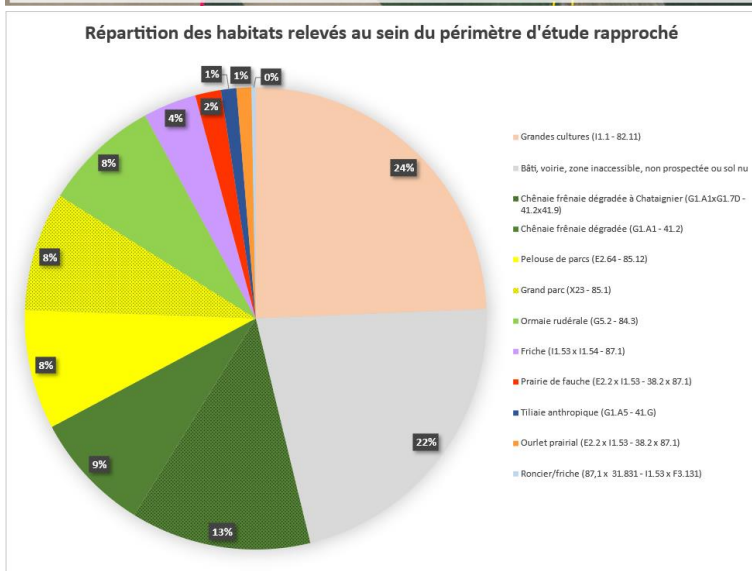
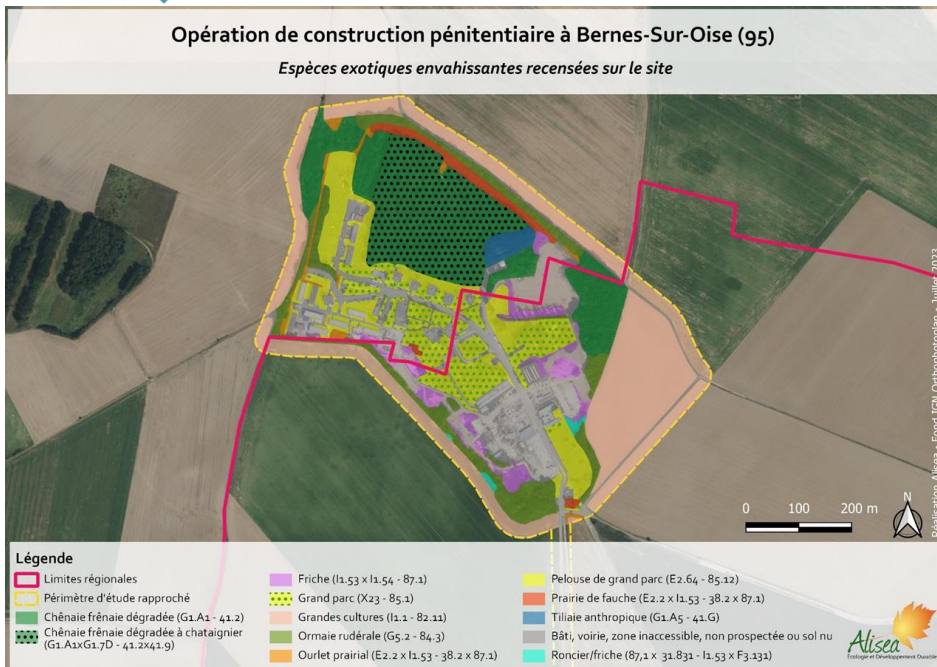
Synthèse des enjeux de la pollution lumineuse au regard de la biodiversité locale

Taxons	Synthèse des éléments	Enjeux de pollution lumineuse retenus	
Flore	<ul style="list-style-type: none"> • Richesse importante • Espèces avec préoccupations mineures 	Très faible (localement faible)	Très fort
Oiseaux	<ul style="list-style-type: none"> • Richesse intéressante • Des habitats favorables mais isolés • Des espèces avec un enjeu fort et des espèces sensibles à la pollution lumineuse 	Fort à très fort	Fort
Mammifères terrestres	<ul style="list-style-type: none"> • Richesse faible • Espèces communes et peu sensibles à la lumière 	Faible	Modéré
Chiroptères	<ul style="list-style-type: none"> • Richesse importante • Des espèces à enjeux • Une forte sensibilité à la lumière 	Très fort	Faible
Reptiles	<ul style="list-style-type: none"> • Richesse écologique faible • Une espèce recensée qui n'est pas sensible à la lumière 	Très faible	Très faible
Amphibiens	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune espèce • Aucun habitat favorable 	Nul	Nul
Invertébrés	<ul style="list-style-type: none"> • Richesse entomologique • Quelques habitats favorables • Forts enjeux de mise en lumière 	Fort	

Les principaux enjeux s'orientent en priorité sur les **chiroptères, puis les oiseaux et les invertébrés**. Ce sont d'une part des espèces très sensibles à la pollution lumineuse et les espèces présentes peuvent y être sensibles. Pour les autres taxons les enjeux sont très faibles à nul.

Les enjeux locaux des habitats et cohérence des écosystèmes

Enjeux sur les habitats



Concernant les habitats sur le périmètre du projet, l'étude écologique mentionne que l'aire d'étude comprend entre 11 habitats

Les habitats sont répartis entre milieux ouverts herbacées, arbustifs et arborés. L'influence anthropique se fait beaucoup ressentir sur le site, par l'omniprésence d'espaces semi-naturels assez pauvres. De nombreuses espèces exotiques envahissantes, plantées ou favorisées par les activités humaines, sont présentes sur le site.

A plus large échelle, la zone et les espaces arborés apparaissent comme un îlot autour d'espaces cultivés intensivement.

Les enjeux sont globalement faibles.

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.

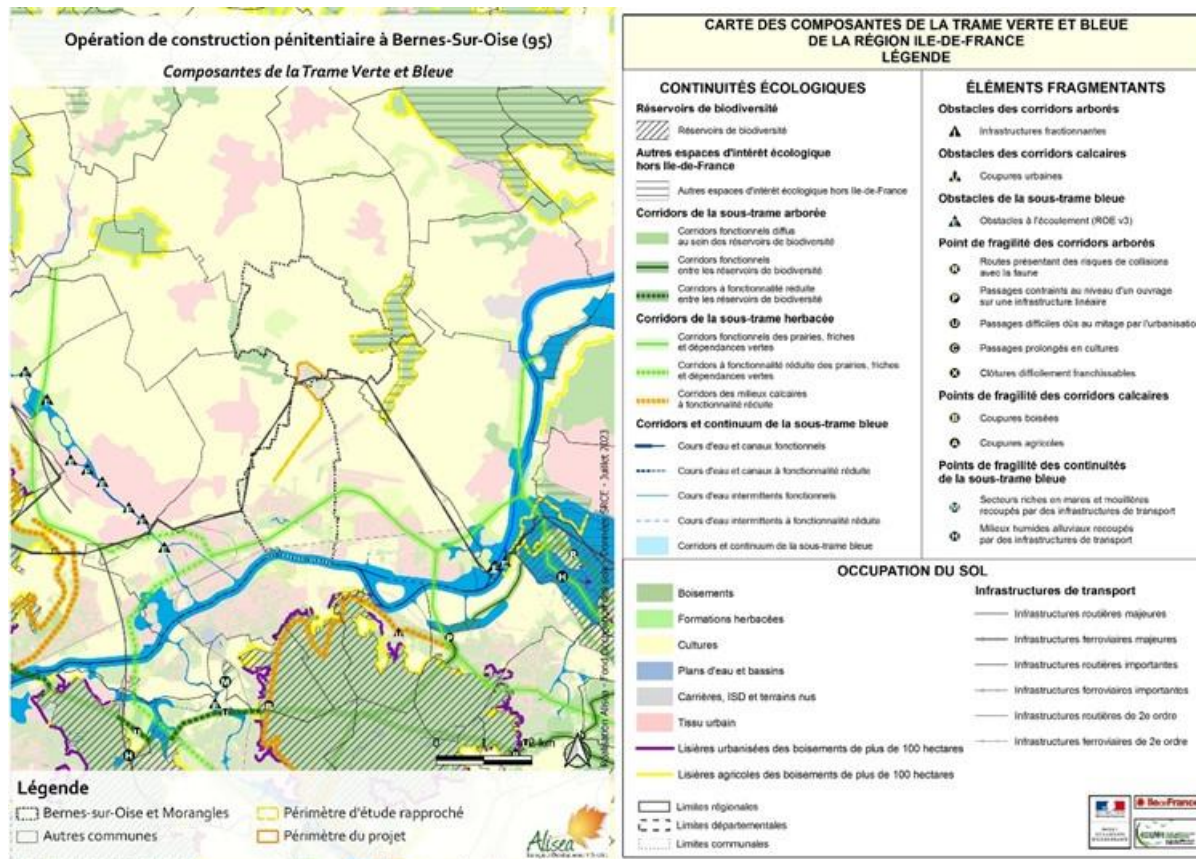
La TVB permet de définir :

- 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



En terme de cohérence écologique, le territoire se montre particulièrement isolé.

D'après le Schéma Régional de Cohérence Écologique d'Ile-de-France et Picardie (SRCE), adopté le 21 octobre 2013 (Figure ci-contre) :

- Le périmètre d'étude se trouve dans une petite enclave d'urbanisation entourée de cultures. Il n'est pas directement concerné par un zonage réglementaire ou d'inventaire.
- Il se situe à moins d'un kilomètre de la ZNIEFF de type I du Bois des bouleaux, avec laquelle il peut avoir un lien, au regard du contexte rural.
- Le site semble assez éloigné des grands espaces à enjeux, classés en site Natura 2000 ou en ZNIEFF de type II (Massifs des trois forêts, Forêt de Carnelle, Vallée de l'Ysieux, etc.). Aucun corridor n'est identifié par le SRCE reliant le périmètre d'étude à ces sites.

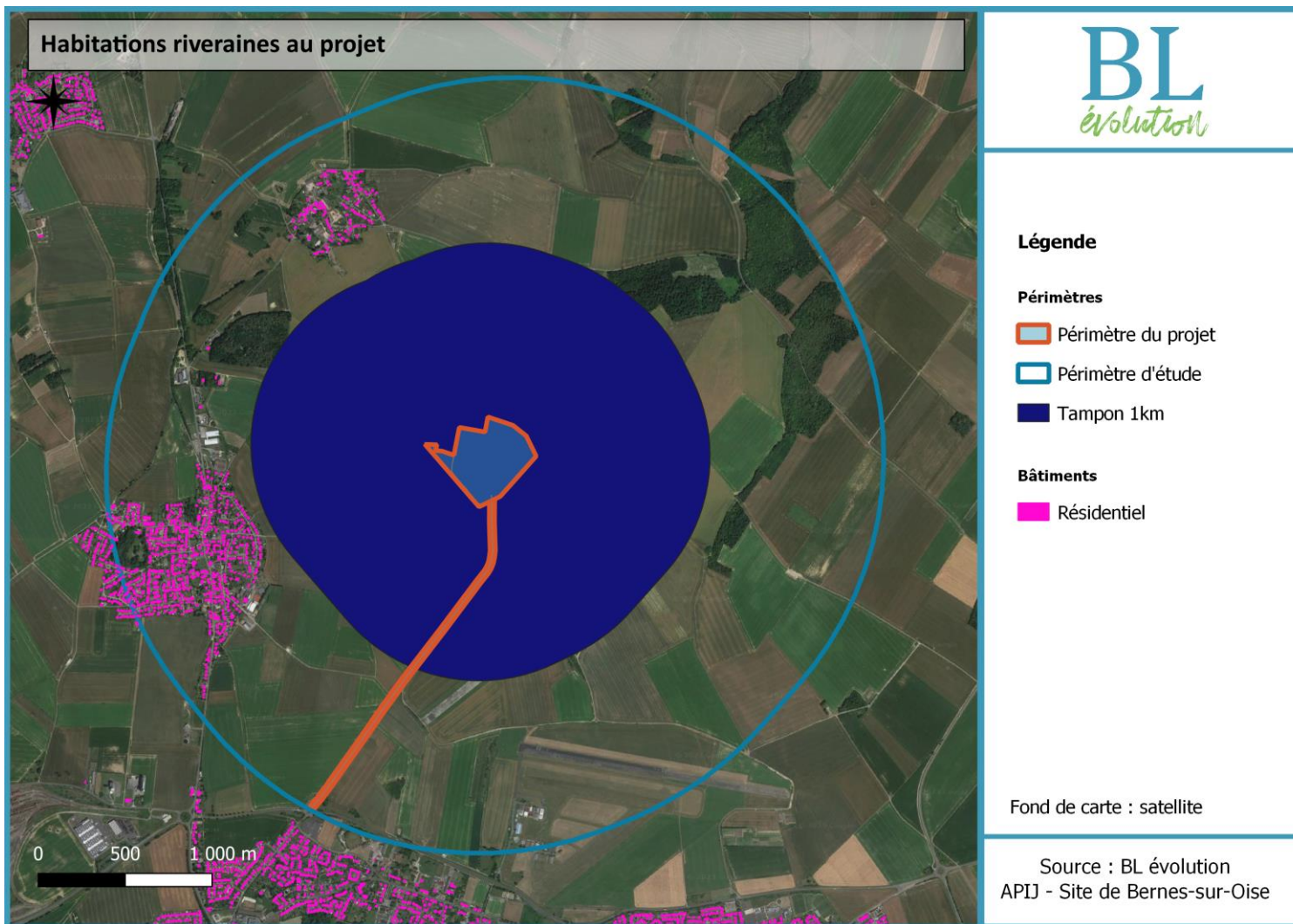
Les enjeux relatifs aux zonages réglementaires, aux zonages d'inventaires et à la trame verte et bleue semblent faibles.

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 avec peu d'enjeu Un effet îlot des espaces forestiers dans un contexte d'agriculture intensive 	Faible
Trame noire	<ul style="list-style-type: none"> Un réservoir de biodiversité à préserver relativement éloigné Pas de corridor écologique 	Faible

Très fort
Fort
Modéré
Faible
Très faible
Nul

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

Aucune habitation n'est présente dans un rayon de 1 km autour du projet. A cette distance, la diffusion de lumière ne pourra pas produire un éclairage direct au sein des habitations.

Enjeu de pollution lumineuse nul.

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 avec plusieurs points lumineux déjà présents, dont certains se situent directement à l'intérieur du projet. Néanmoins, le reste du périmètre d'étude est totalement épargné par la pollution lumineuse directe. Le site d'étude représente un îlot de lumière dans une vaste zone sans éclairage.
- Du point de vue de la pollution lumineuse indirecte, à l'échelle régionale, le site s'inscrit dans des conditions défavorables, touchées par le halo lumineux global d'Île-de-France, 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 des communes proches. L'obscurité du ciel est typique des zones suburbaines de la région parisienne avec une qualité sous influence forte. L'analyse satellite montre des émissions directes relativement éloignées du périmètre mais qui peuvent avoir une légère influence.
- En conclusion, le territoire s'inscrit dans une qualité d'obscurité déjà dégradée.

Enjeux :

Les enjeux écologiques:

- Le périmètre s'inscrit dans un site anthropisé qui laisse peu de place à la biodiversité. Néanmoins, certains espaces naturels restent intéressants. On notera une nouvelle fois, un effet d'îlot de biodiversité au milieu d'espaces cultivés.
- 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, puis les oiseaux et les insectes. 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 faibles, notamment car les espaces restent peu favorables.
- Concernant la cohérence des écosystèmes, peu d'éléments sont présents pour une bonne cohérence en matière de trame verte bleue et par conséquent, noire.

Enjeux humains :

Les premiers bâtiments résidentiels se situent loin du projet, à plus de 1km. Cet éloignement implique peu de risques d'enjeux pour les habitants.

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

- Scénario initial
- Scénario complémentaire

Principes :

La scénarisation est basée sur le **plan de masse du projet** 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.

La simulation est établie selon deux scénarios :

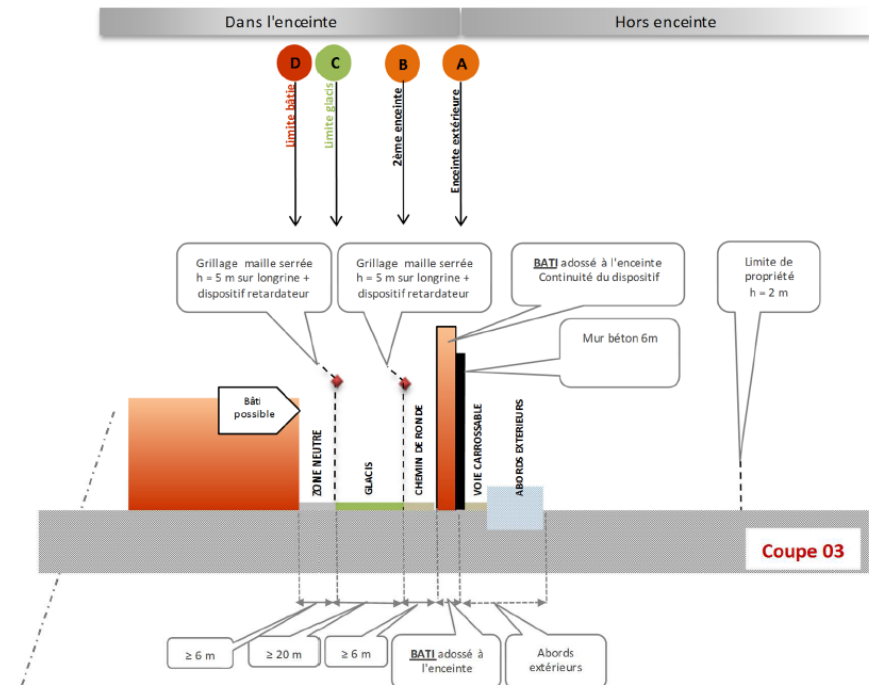
- **Scénario 1 (mai 2023)** : seules les limites des enceintes sont connues, les points lumineux sont répartis aléatoirement pour répondre aux exigences
- **Scénario 2 (octobre 2023)** : la localisation et la hauteur de bâtiments sont connues et la répartition des points lumineux s'appuie sur ces éléments en tenant compte des obligations réglementaires.

Le Chemin du Crouy est ajouté au scénario 2 mais celui-ci ne sera pas éclairé.

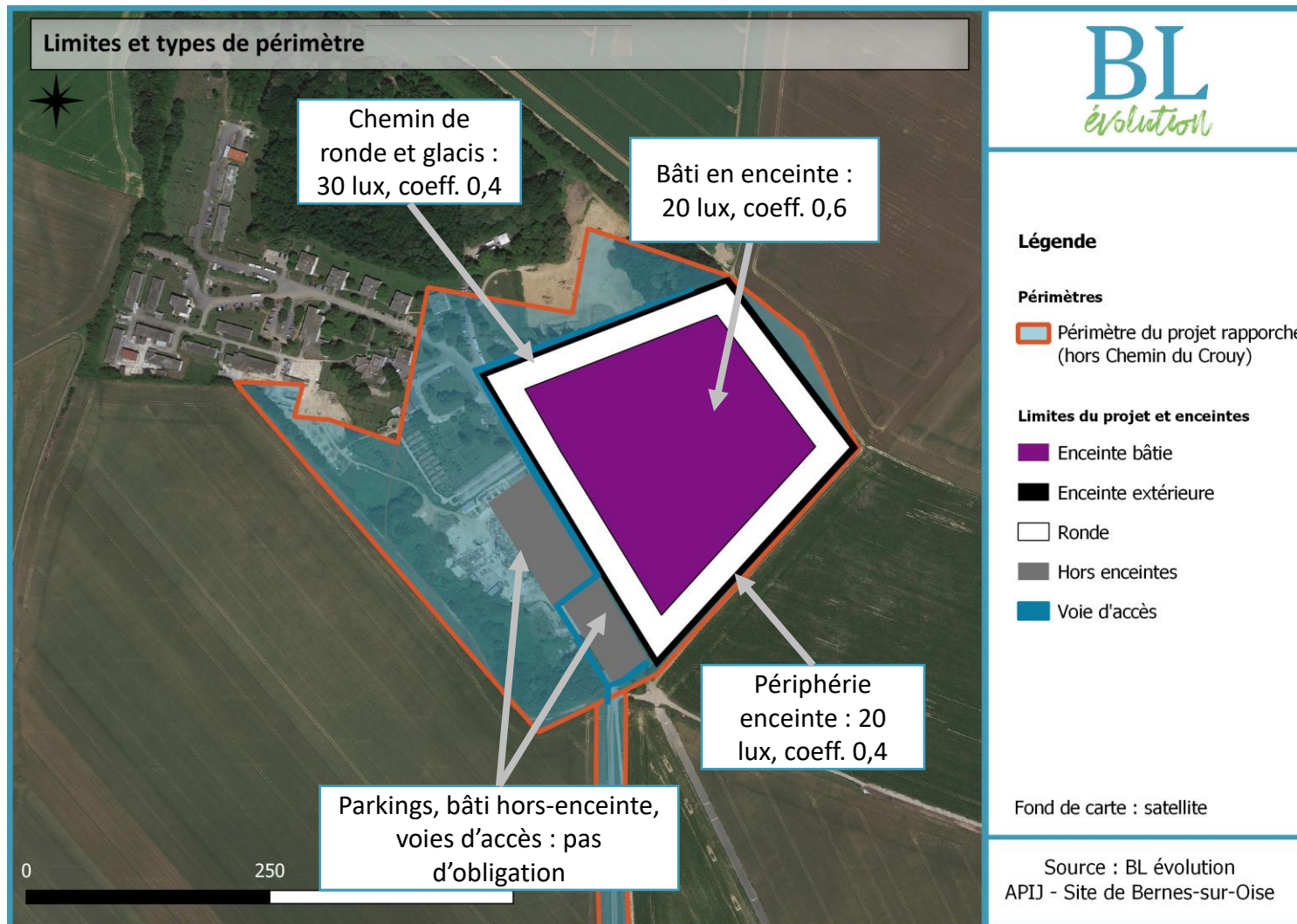
Méthode de scénarisation :

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 (accueillant potentiellement parking et bâtiments hors enceinte)
- Routes et voies d'accès



Plan du projet 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 est le rapport entre l'éclairage minimum et l'éclairage moyen.

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.

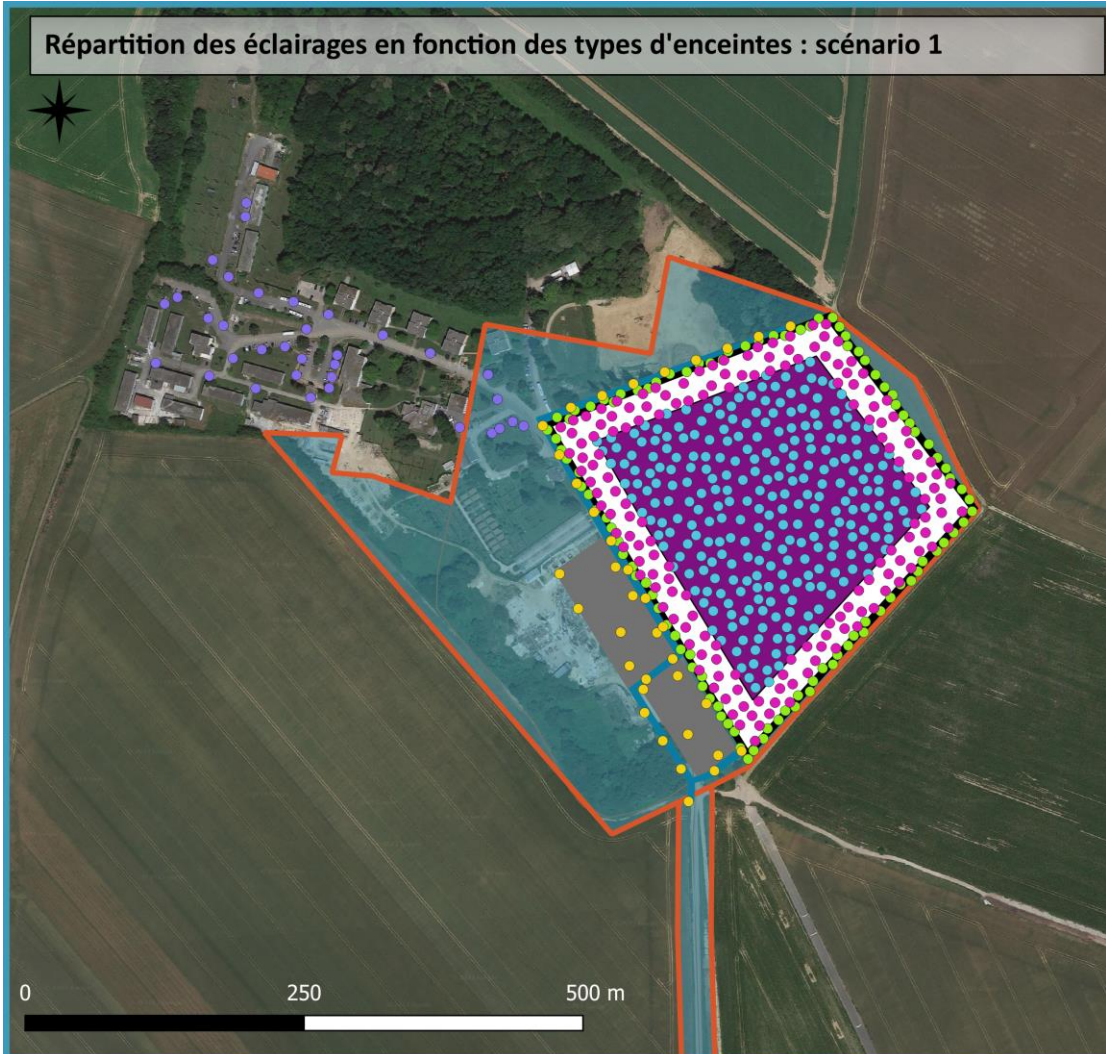
Par exemple : avec un éclairage moyen de 20 lux et un coefficient de 0,4, l'éclairage minimum sur la zone doit être de 8 lux, alors qu'avec un coefficient de 0,6, l'éclairage minimum doit être de 12 lux (donc un meilleur confort visuel).

Ces données de base sont l'unique entrée pour la simulation du scénario 1.

Scénario 1 : Simulation de la position des points lumineux sur le futur projet

Scénario 1 (juin 2023) tenant uniquement compte des limites des enceintes


Répartition des éclairages en fonction des types d'enceintes : scénario 1








BL
évolution

Légende

Périmètres

 Périmètre du projet rattaché (hors Chemin du Crouy)

Répartition des points (scénario 1)

-  Enceinte extérieure
-  Eclairages existants
-  Glacis et chemins de ronde
-  Limite bâtie
-  Chemin d'accès et annexes

Fond de carte : satellite

Source : BL évolution
APIJ - Site de Bernes-sur-Oise

Le projet est constitué de 4 zones avec des éclairages différents attendus. Les points lumineux ont été répartis de manière aléatoire dans chaque zone. Cette répartition recherche néanmoins le respect des minimums d'éclairage réglementaires. Cela implique des distances minimums entre les points et des hauteurs de points adaptées.

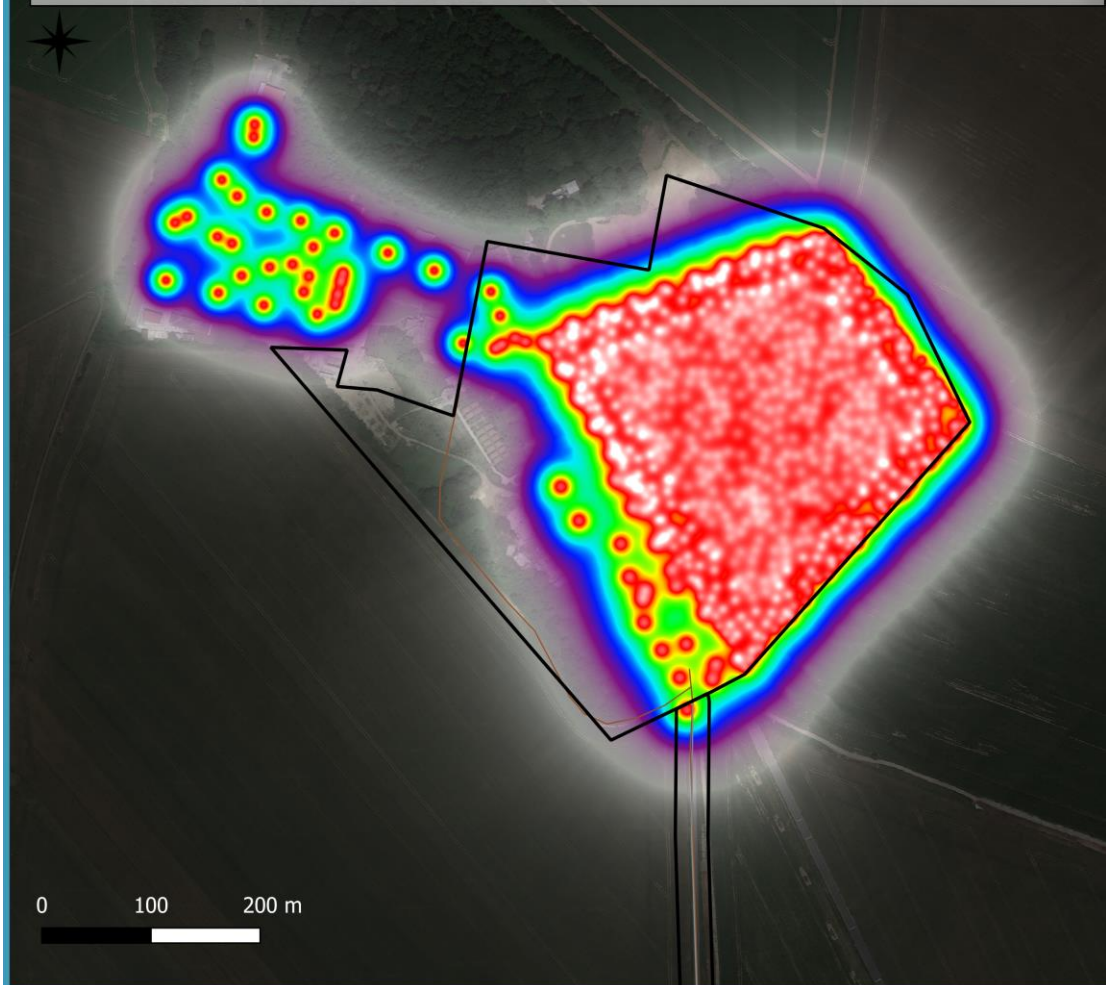
- Zone bâtie en enceinte :
 - Eclairage à 6 mètres de hauteur, un point tous les 11 mètres
 - Une puissance modérée (LED 50W)
- Zone Glacis :
 - Eclairage à 4 mètres de hauteur, un point tous les 8 mètres
 - Puissance faible (LED 40W)
- Zone périphérie enceinte :
 - Eclairage à 6 mètres de hauteur et un luminaire tous les 15 mètres
 - Puissance modérée (LED 40W)
- Zone annexe :
 - Eclairage à 8 mètres de hauteur et un luminaire tous les 30 mètres
 - Puissance modérée (LED 50W)

Le Chemin du Crouy n'est pas éclairé.

Modélisation des éclairagements estimés


Scénario 1 (juin 2023) tenant uniquement compte des limites des enceintes

Modélisation de l'éclairage : scénario 1

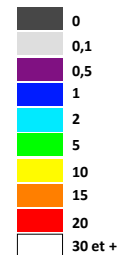


BL
évolution

Légende

 Périmètre du projet
(hors Chemin du Crouy)

Eclairage lux



Fond de carte : Satellite

Source : BL évolution
APIJ - Site de Bernes-sur-Oise

La simulation montre un éclairage plus concentré et plus important au niveau l'enceinte centrale. Au centre l'éclairage peut atteindre jusqu'à 55 lux.

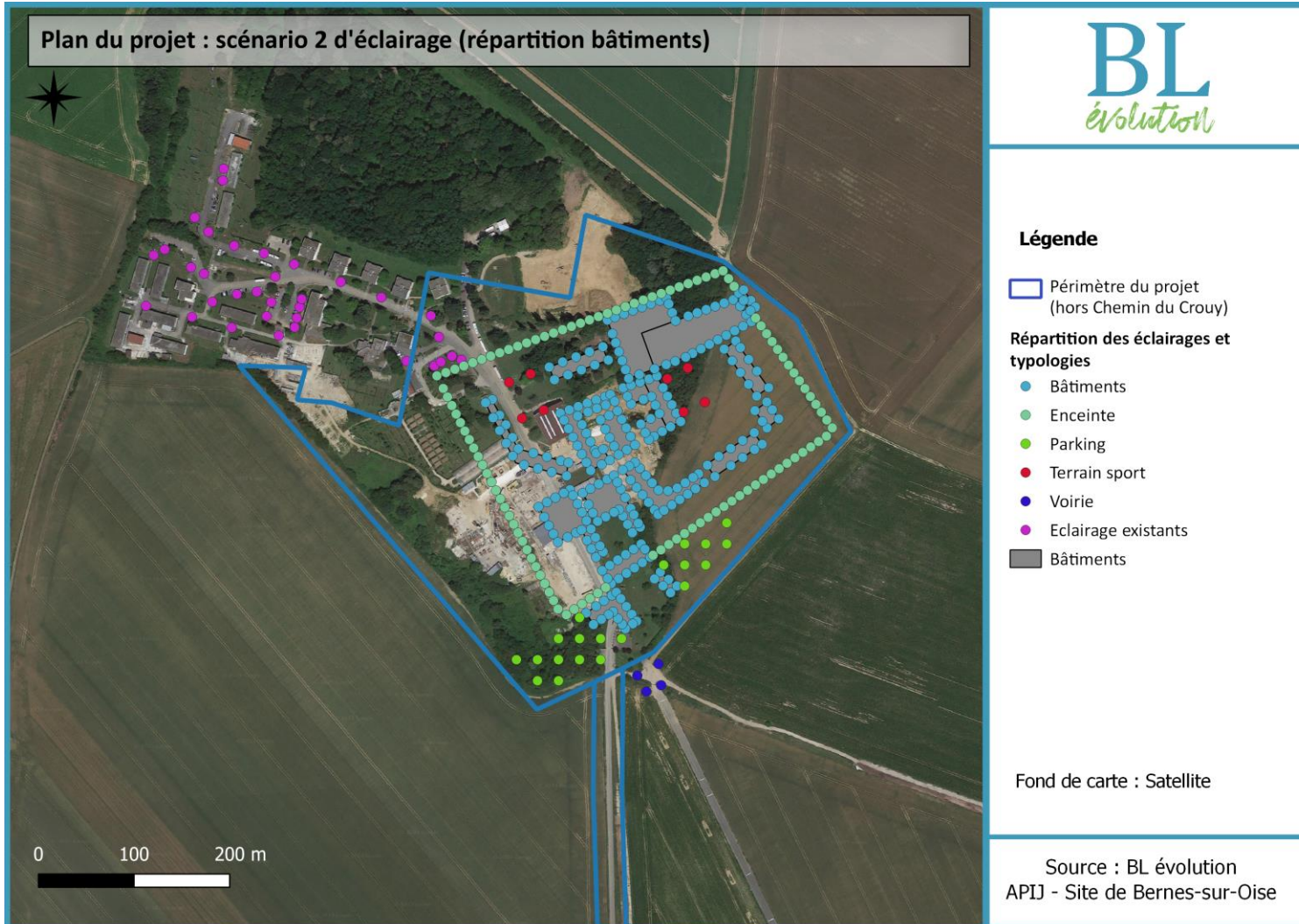
Les enceintes extérieures et glacis ont un éclairage pouvant atteindre 45 lux, avec une certaine homogénéité (points lumineux rapprochés).

L'éclairage sur les annexes et voie d'accès peuvent atteindre jusqu'à 40 lux au maximum.

La surface réceptrice d'un éclairage minimum peut atteindre 70 mètres au-delà des limites du projet.

Scénario 2 : Simulation de la position des points lumineux sur le futur projet

Scénario 2 (octobre 2023) tenant compte du plan de masse affiné, des bâtiments et de leur hauteur



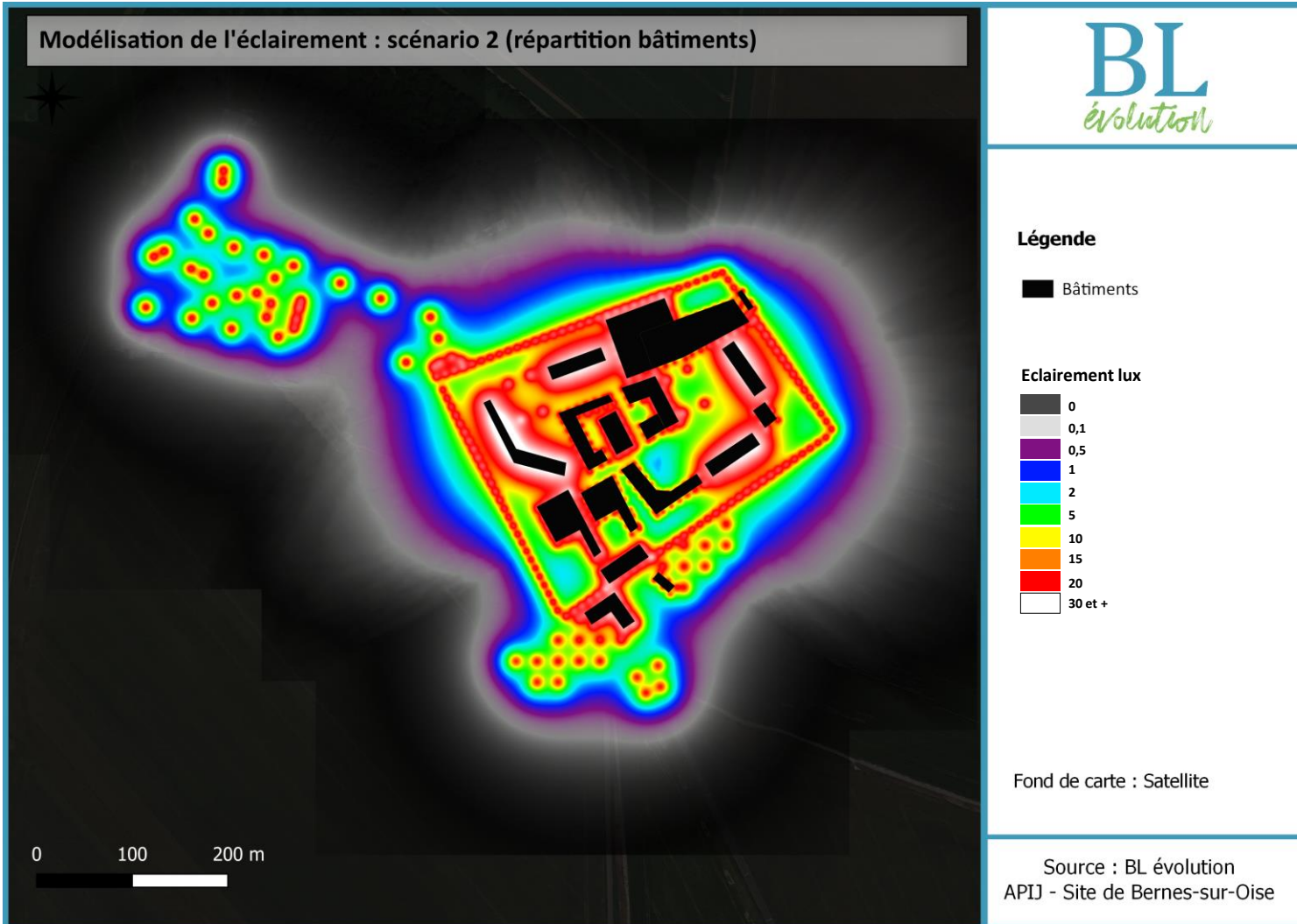
Le plan de masse a permis d'identifier les bâtiments et leur hauteur. Les éclairages sont cette fois répartis selon l'emplacement des bâtiments et en fonction des hauteurs.

- Bâtiments :
 - Hauteurs dépendantes de hauteurs de bâtiments (R0 à R+4)
 - Une puissance adaptée à la hauteur en fonction des besoins réglementaires
- Mur d'enceinte extérieur :
 - Hauteur de l'éclairage à 4 mètres (mur d'enceinte est à 6 mètres) et un luminaire tous les 10 mètres
 - Puissance faible (LED 30W)
- Parking et parvis :
 - Hauteur de l'éclairage à 8 mètres et un luminaire tous les 30 mètres
 - Puissance modérée (LED 50W)
- Voirie :
 - Hauteur de l'éclairage à 8 mètres et un luminaire tous les 30 mètres
 - Puissance modérée (LED 50W)

A noter que le chemin du Crouy n'étant pas prévu d'être éclairé, aucun point lumineux n'est affecté.

Modélisation des éclairagements estimés

Scénario 2 (octobre 2023) tenant compte du plan de masse affiné, des bâtiments et de leur hauteur



La simulation montre un éclairage plus concentré et plus important au niveau des bâtiments les plus hauts (maximum : 60 lux).

L'enceinte extérieure peut atteindre jusqu'à 30 lux.

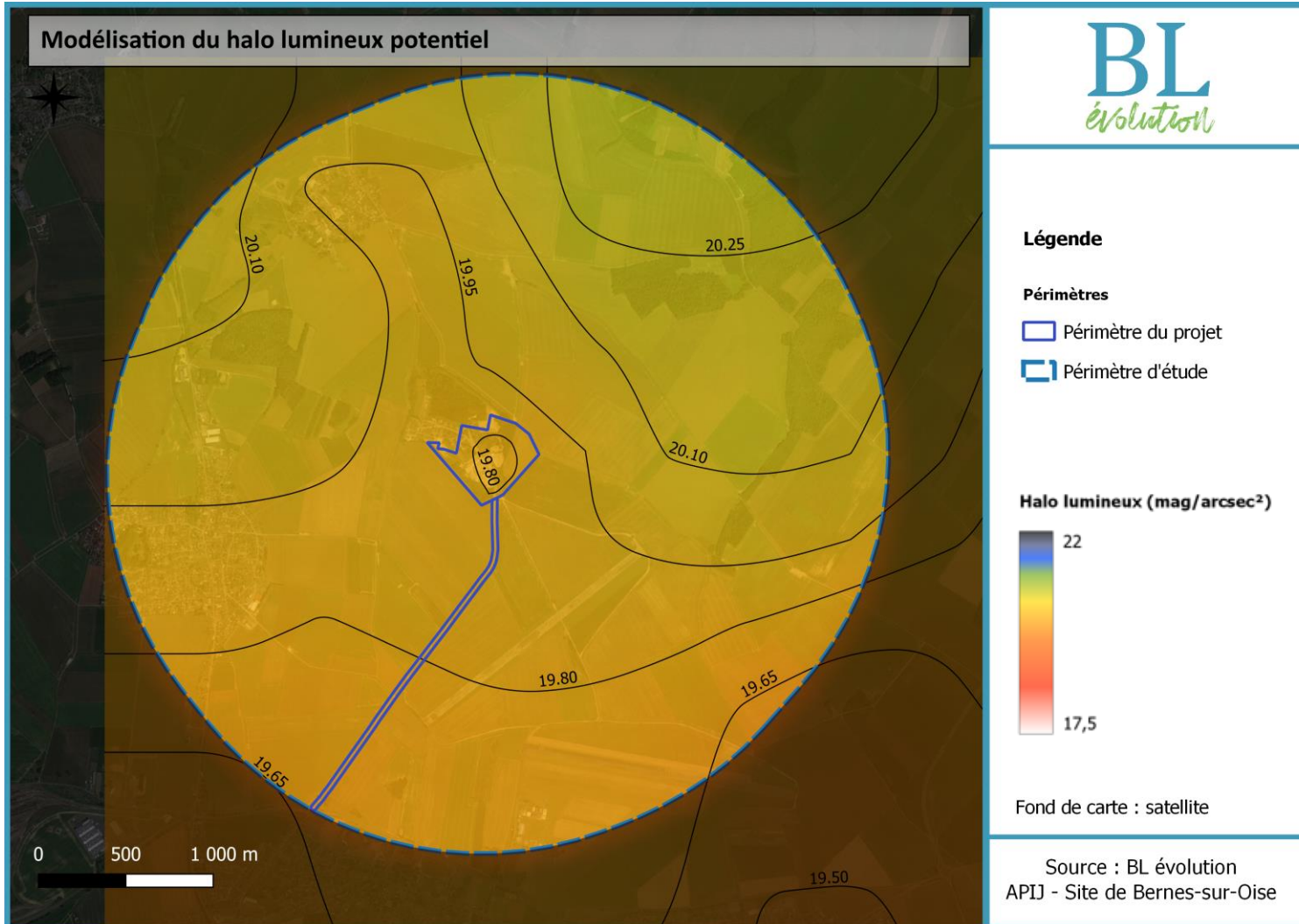
L'éclairage sur les annexes et voie d'accès peuvent atteindre jusqu'à 30 lux au maximum.

La surface réceptrice d'un éclairage minimum peut atteindre 70 mètres au-delà des sources d'éclairages.

À partir de cette modélisation de l'éclairage, nous avons procédé au calcul permettant de convertir les données d'éclairage en luminance (candela/m²) pour estimer, de manière théorique, l'influence du futur projet sur l'obscurité du périmètre d'étude. Cela permet d'estimer la qualité de l'obscurité du ciel, après la mise en place du projet.

Modélisation du halo lumineux du projet

Modélisation valable pour le scénario 1 et 2.



Les deux scénarios étant similaires pour une analyse « halo lumineux », la modélisation est identique pour les scénarios 1 et 2.

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'éclairement en magnitude montre une influence au niveau du périmètre du projet et des espaces proches.

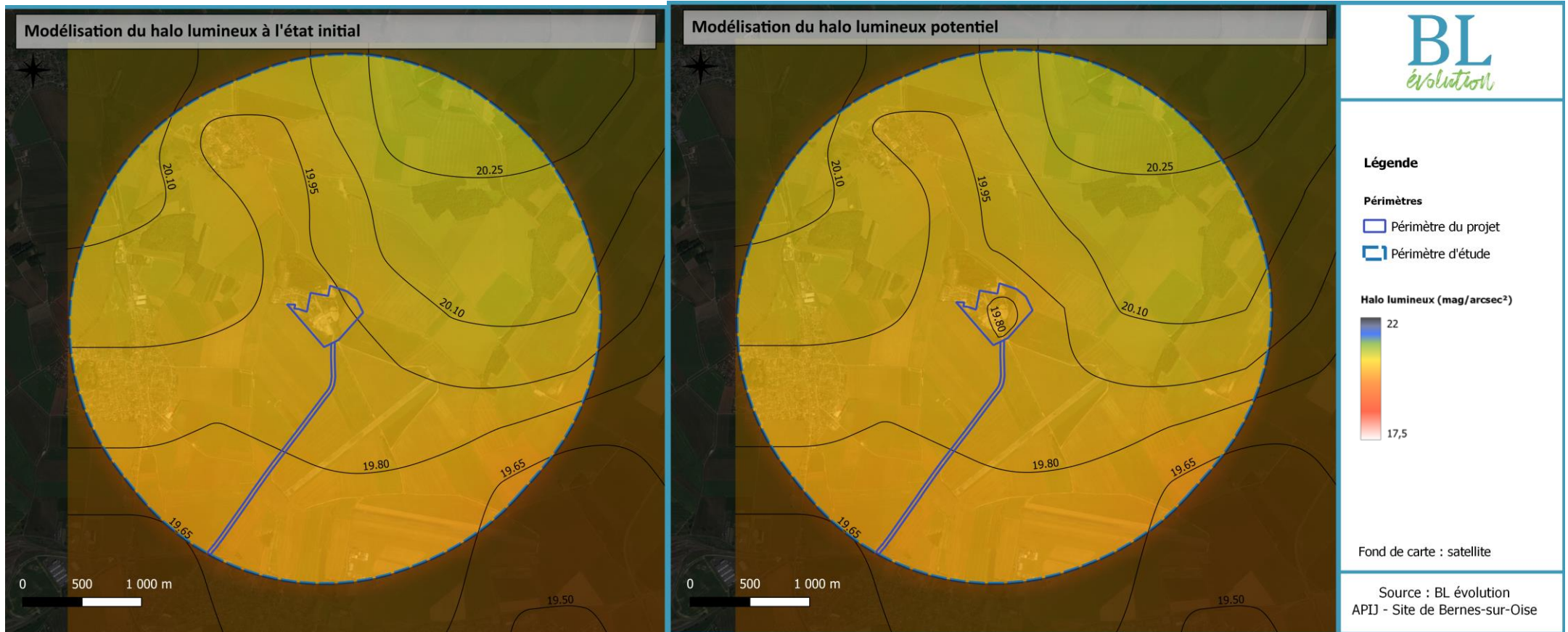
L'influence la plus importante est concentrée au centre du projet, avec une magnitude qui atteint 19,80 mag/arcsec² par rapport à 19,95 mesurée à l'état initial.

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 19,65 mag/arcsec² au niveau du projet. Le reste des espaces sont très peu influencés.

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



Comparaison entre l'état initial et l'état projeté

L'influence du projet sur le halo lumineux reste limitée selon la scénarisation imaginée. En effet, celle-ci reprend une simulation d'éclairage qui intègre des paramètres qui permettent de respecter la réglementation en termes de nuisances lumineuse (arrêté du 27 novembre 2018). Cela concerne notamment qu'aucun éclairage diffuse de la lumière directement vers le ciel, ce qui limite la production d'un halo lumineux fort.

De plus, cette influence reste minime car le site s'inscrit dans des conditions d'obscurité dégradées à l'état initial. La quantité de radiance issue du projet est ainsi peu significative par rapport aux conditions actuelles.

On notera une influence principalement visible au centre du projet avec une influence sommaire sur les zones proches.

Pollution lumineuse directe simulée:

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

- Deux simulations ont été menées.
 - La première en définissant une répartition aléatoire de points lumineux qui permettent de répondre aux enjeux réglementaires. 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.
 - La seconde, avec une précision plus importante, en définissant une répartition définie selon les bâtiments et leur hauteur et une puissance qui permet de répondre aux exigences réglementaires. Les résultats sont ainsi plus précis
- Les simulations de l'éclairage ont des résultats assez similaires et montrent que le niveau le plus élevé est à attendre principalement au centre du périmètre, au niveau des espaces avec des bâtiments. Les zones extérieures à l'enceinte recevront un éclairage non-négligeables mais moins marqués.
- 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 70 mètres au-delà du périmètre, pouvant atteindre certains espaces naturels.

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'Île-de-France, et, plus localement, par les communes de Bernes-sur-Oise ou encore de Persan
- Les résultats de la modélisation font apparaître une légère 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 très rapidement. Impliquant une modification minimale.
- 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 mince, 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 taxon 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 : enjeu très faible

- Habitat banal et anthropisé
- Aucune espèce protégée

Impacts du projet après simulations

L'enjeu très 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.

- Impact nul

Avifaune

Enjeux à l'état initial : enjeu fort

- Îlot de biodiversité
- Enjeu fort pour la nidification
- Présence d'habitats pertinents, notamment les haies à proximité du projet

Impacts du projet après simulations

Les habitats proches du projet pourront être directement éclairés par les points lumineux sur les zones extérieurs.

Impacts :

- Niches : recul des zones de nichage des oiseaux diurnes (haies, forêt).
- Barrière écologique : grande migration difficile/rallongée/retardée.

Les effets probables du projet sur la biodiversité

Mammifères (hors chiroptères):

Enjeux à l'état initial : enjeu faible

- Espèces communes
- Une espèce protégée

Impacts du projet après simulations

Certaines zones, comme les haies, bosquets et zones boisées sont favorables aux mammifères pour les déplacements notamment. La simulation implique plusieurs milieux qui pourront recevoir un éclairage direct.

Impacts

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

Chiroptères :

Enjeux à l'état initial : enjeu très fort

- Diversité d'espèce importante
- Des espèces particulièrement sensibles 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 et des milieux naturels pertinents.

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.

Les halos lumineux de fortes intensités sont aussi particulièrement impactants pour les chauves-souris, qui y sont particulièrement sensibles. Les chiroptères sont un des seuls taxons faisant l'objet d'étude au regard des enjeux d'halo lumineux.

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.

Les effets probables du projet sur la biodiversité

Reptiles :

Enjeux à l'état initial : enjeu très faible

- Une espèce commune
- Peu d'enjeu de mise en lumière

Impacts du projet après simulations

Pas d'impact significatif

Amphibiens

Enjeu à l'état initial : enjeu nul

- Aucune espèce observée
- Pas de milieu favorable

Impacts du projet après simulation :

Pas d'impact significatifs

Insectes :

Enjeux à l'état initial : enjeu fort

- Diversité d'espèce importante
- Des espèces communes présentes
- Des habitats pertinents (pelouse et forêt)

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.

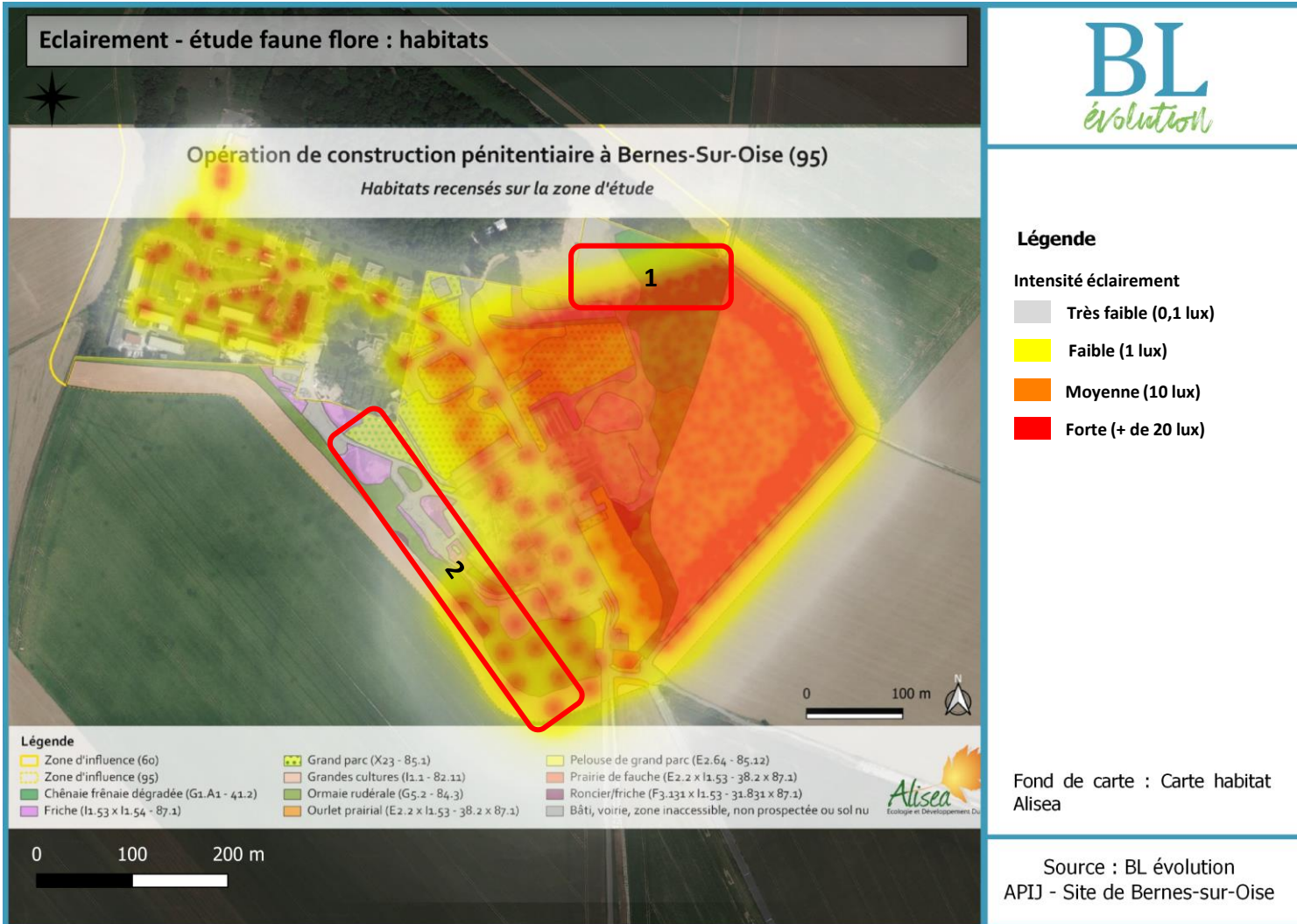
Des éclairagements importants pourront toucher des zones à habitats importants.

Impacts :

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

Scénario 1 : Analyse des impacts sur les habitats

Scénario 1 (juin 2023) tenant uniquement compte des limites



Combinaison de l'éclairage du projet sur la carte d'habitats

En superposant les cartographies de l'étude faune/flore avec les habitats, l'éclairage pourra avoir une influence certaine :

- La chênaie frênaie dégradée au nord du périmètre de la scénarisation (zone 1).
- L'ormiaie rudérale au sud du périmètre d'étude (zone 2).
- Les zones de grands et de friche au centre.

Les zonages à l'intérieur du périmètre pourront aussi être touchés, mais seront directement impactés par le changement d'occupation des sols (prioritaire en matière d'impact par rapport à la pollution lumineuse).

Cette analyse combinée entre l'éclairage et les habitats, montre que plusieurs espaces écologiques pertinents pourront être touchés au-delà des limites du périmètre du projet.

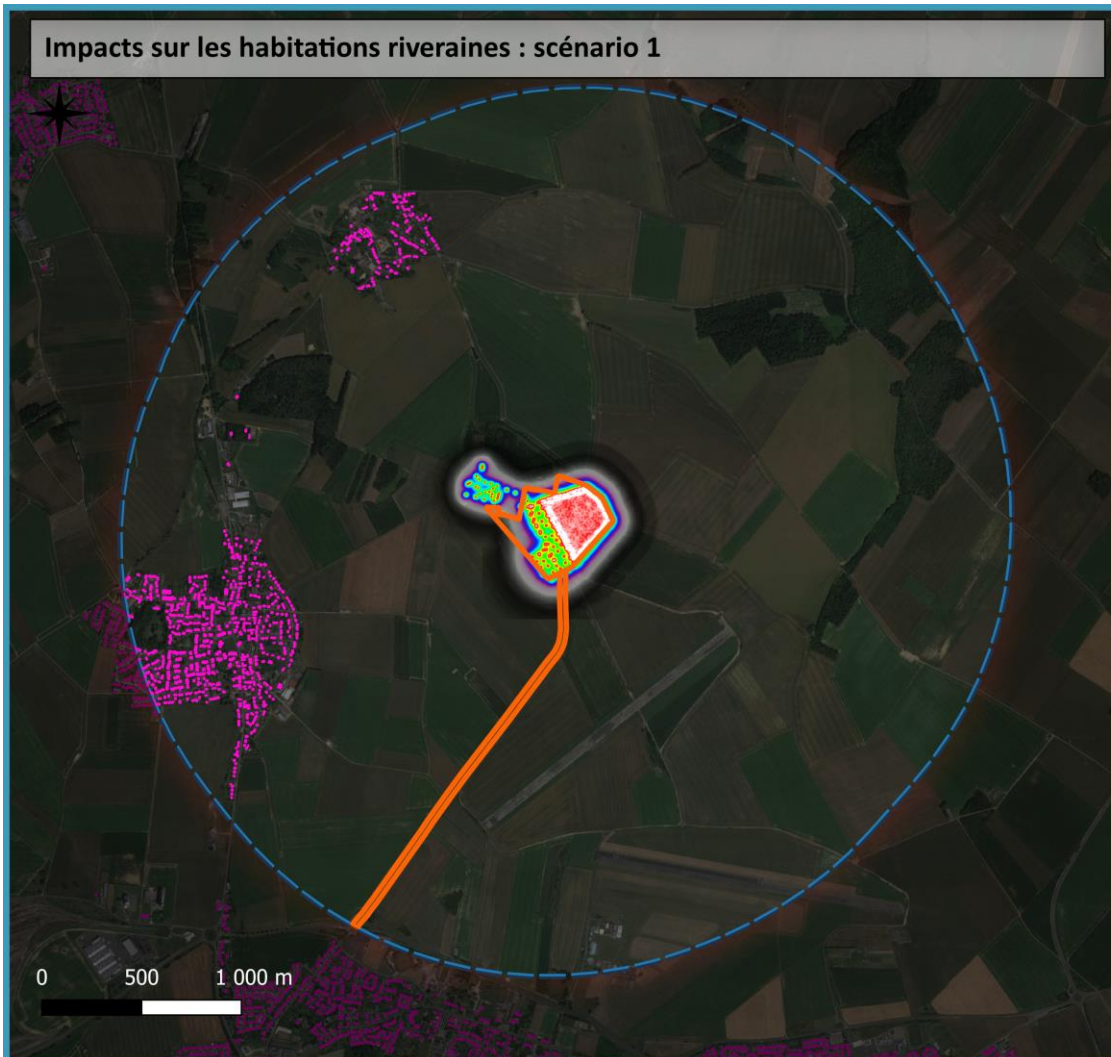
Néanmoins, les habitats restent assez peu pertinents. L'impact sera faible.

Le Chemin du Crouy n'est pas présent car il ne sera pas éclairé, donc non-concerné.

Scénario 1 : Impacts des riverains

Scénario 1 (juin 2023) tenant uniquement compte des limites

Impacts sur les habitations riveraines : scénario 1



BL
évolution

Légende

Périmètres

 Périmètre du projet

 Périmètre d'étude

Bâtiments

 Résidentiel

Fond de carte : satellite

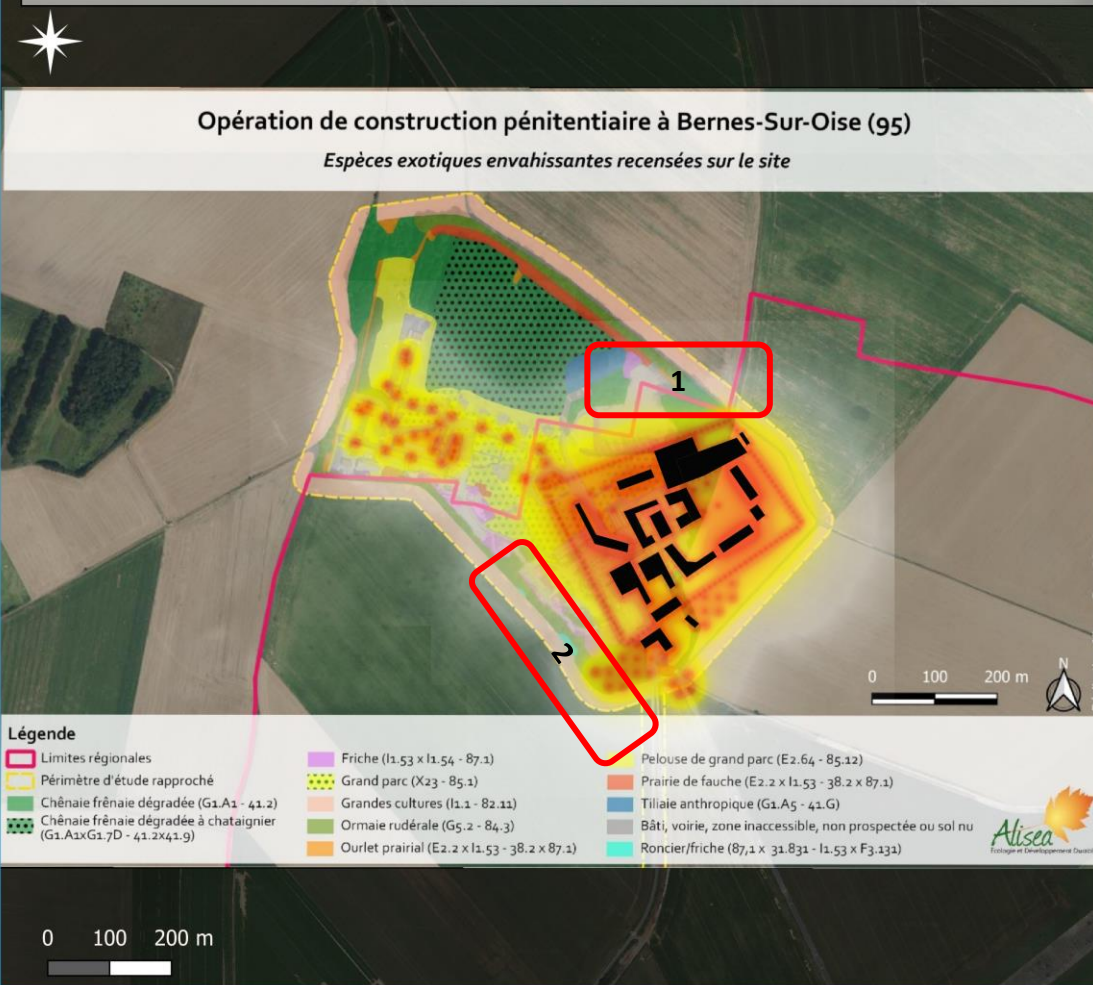
Source : BL évolution
APIJ - Site de Bernes-sur-Oise

Aucune source de lumière simulée n'atteindra les habitations riveraines du projet.

Scénario 2 : Analyse des impacts sur les habitats

Scénario 2 (octobre 2023) tenant compte du plan de masse affiné, des bâtiments et de leur hauteur

Eclaircissement - étude faune flore (juillet 2023) : habitats (scénario 2)



BL
évolution

Légende

Intensité éclaircissement

- Très faible (0,1 lux)
- Faible (1 lux)
- Moyenne (10 lux)
- Forte (+ de 20 lux)

Fond de carte : carte habitat Aliséa (Juillet 2023)

Source : BL évolution
APIJ - Site de Bernes-sur-Oise

Combinaison de l'éclaircissement (scénario 2) du projet sur la carte d'habitats

En superposant les cartographies avec le second scénario, les zones touchées restent similaires.

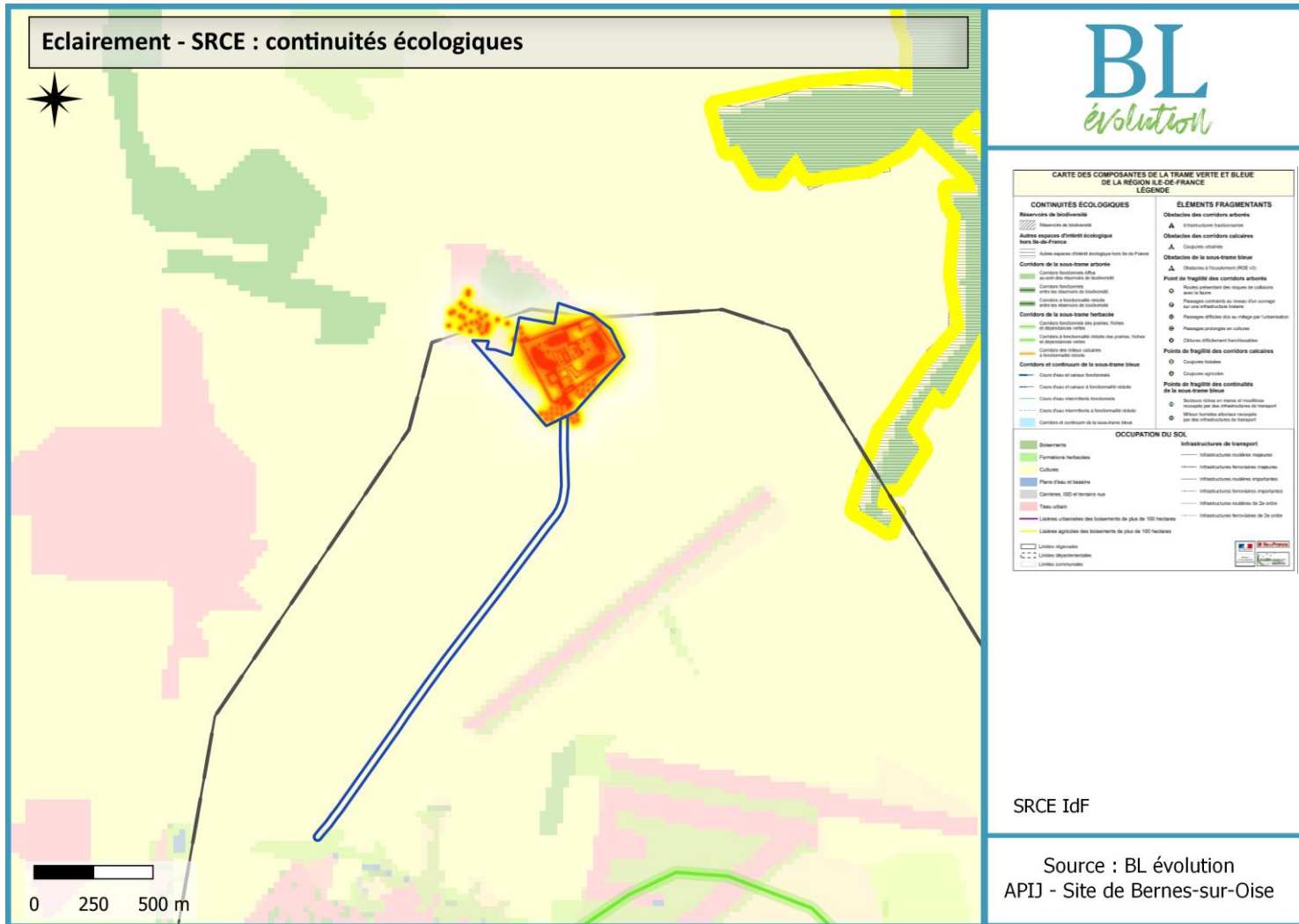
- En affinant l'analyse d'éclaircissement, la chênaie frênaie dégradée (zone 1) serait moins touchée.
- Sur la zone 2, l'ormie rudérale au sud du périmètre d'étude serait aussi touchée mais la présence d'un parking rend l'imperméabilisation un enjeu plus important que la pollution lumineuse.
- Les zones de grands parcs et de friche seront de nouveau concernées par un éclaircissement direct qui pourra être nocif.

Scénario 2 : Analyse des impacts sur la cohérence des écosystèmes

Scénario 2 (octobre 2023) tenant compte du plan de masse affiné, des bâtiments et de leur hauteur

Notion de trame noire (scénario 2)

Les impacts du scénario restent particulièrement limités pour la trame verte et bleue.



Scénario 2 : Impacts des riverains

Scénario 2 (octobre 2023) tenant compte du plan de masse affiné, des bâtiments et de leur hauteur

Impacts sur les habitations riveraines : scénario 2



BL
évolution

Légende

Périmètres

 Périmètre du projet

 Périmètre d'étude

Bâtiments

 Résidentiel

Fond de carte : satellite

Source : BL évolution
APIJ - Site de Bernes-sur-Oise

Idem pour le scénario 2, les sources de lumière simulées n'impliqueront pas d'éclairage direct au sein des zones d'habitation.

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"> Pas d'impact significatif 	Nul
Avifaune	<ul style="list-style-type: none"> Niches : recul des zones de nichage des oiseaux diurnes (haies, forêt). 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
Reptile	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'impact significatif 	Nul
Amphibiens	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'impact significatif 	Nul
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
Habitats	<ul style="list-style-type: none"> Des zones pertinentes touchées par un éclairage direct Des habitats qui restent très anthropisés 	Faible
Trame noire	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'impact significatif 	Nul
Riverains	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'impact significatif 	Nul

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 rapportées 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 lumens 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 lumens		
Résultats	Lumen max de mes sources : 2000lumen / 2 lampadaires prévus = 1000 lumens		

- 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 habitats présents sur la partie nord et sud du projet.
- **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. Cela permettra de réduire l'impact sur les chauves-souris
- **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.

Résumé des mesures et contextualisation

Mesures correctrices	Zones privilégiées	Bénéfices
Ampoule avec des températures de couleur basses (<2700K)	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 22h	Parkings et voie d'accès	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction des impacts sur les habitats, notamment ceux au sud qui sont plus concernés
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 le parking, voie d'accès et les bâtiments hors-enceinte à 22h. 	
INVERTÉBRÉS	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser un verre de protection Lampadaire avec un indice de protection (IP) supérieur à 65. • Concentrer l'éclairage direct à l'intérieur de l'enceinte • Limiter la densité de lumen par surface • Eteindre le parking, voie d'accès et les bâtiments hors-enceinte à 22h. • Limiter l'éclairage des haies et forêts 	<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)
AMPHIBIENS	<ul style="list-style-type: none"> • Limiter l'éclairage direct à l'intérieur de l'enceinte • Limiter la hauteur des éclairage inférieur ou égale à 4 mètres • Eteindre le parking, voie d'accès et les bâtiments hors-enceinte à 22h. • Limiter l'éclairage des haies et forêts 	<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 	<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 le parking, voie d'accès et les bâtiments hors-enceinte à 22h. 	<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 le parking, voie d'accès et les bâtiments hors-enceinte à 22h. • Limiter l'éclairage des haies et forêts 	<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 le parking, voie d'accès et les bâtiments hors-enceinte à 22h. • Limiter l'éclairage des haies et forêt 	<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 Bernes-sur-Oise 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 avec une obscurité du ciel qui est déjà dégradée et plusieurs points lumineux sont présents au sein du centre de formation.

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 chiroptères, de l'avifaune et des insectes qui montrent des enjeux importants.

Concernant les habitats, plusieurs espaces proches pouvaient montrer un certain intérêt au regard de la biodiversité, mais ces espaces sont très anthropisés. On notera tout de même un effet d'îlot entouré d'espaces très ouverts et peu pertinents pour les milieux naturels.

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 certaines zones naturelles proches 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. 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.

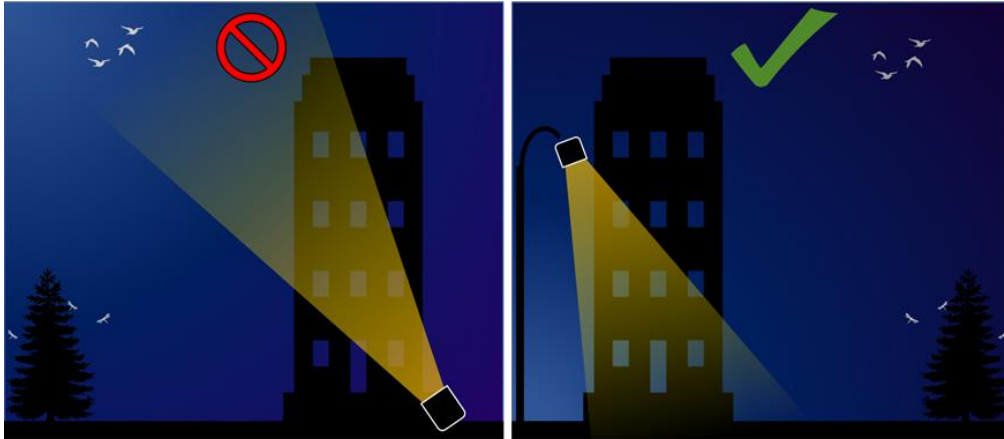
Concernant les riverains, aucun bâtiment accueillant des riverains, ne recevra un éclairage direct.

Les impacts sur la biodiversité nocturne sont assez faibles notamment au regard des conditions initiales d'obscurité et des enjeux identifiés. A l'exception des chiroptères sur lesquelles le projet pourra avoir un impact fort ainsi que pour les oiseaux et insectes avec un impact modéré. Les mesures correctrices doivent être suivies au maximum pour atténuer l'enjeu du projet de Bernes-sur-Oise.

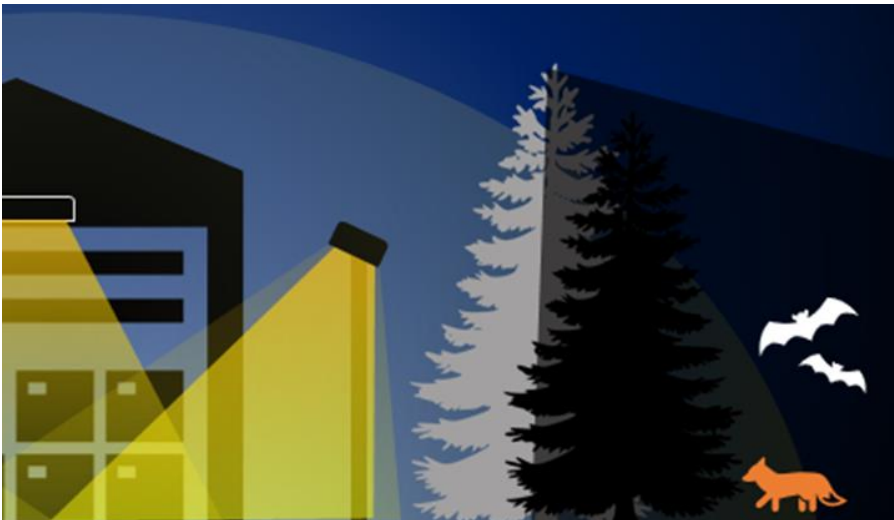
Préconisations générales

Maîtriser les flux lumineux

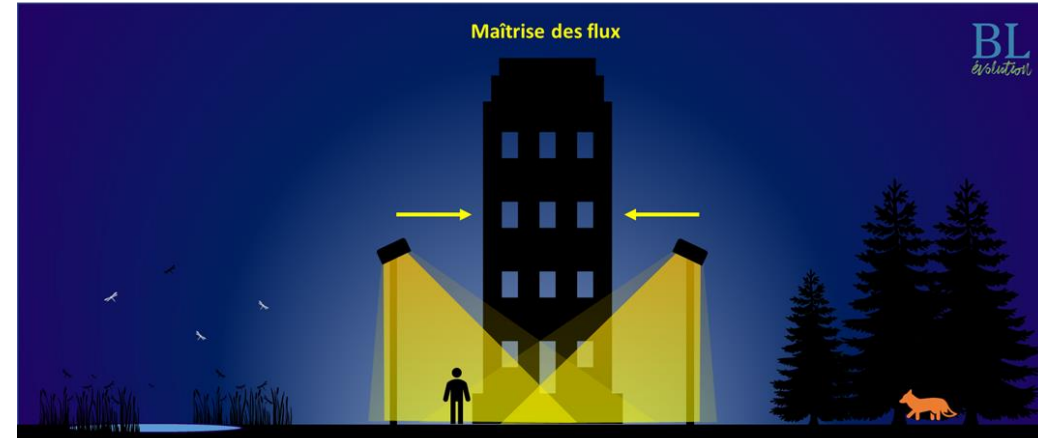
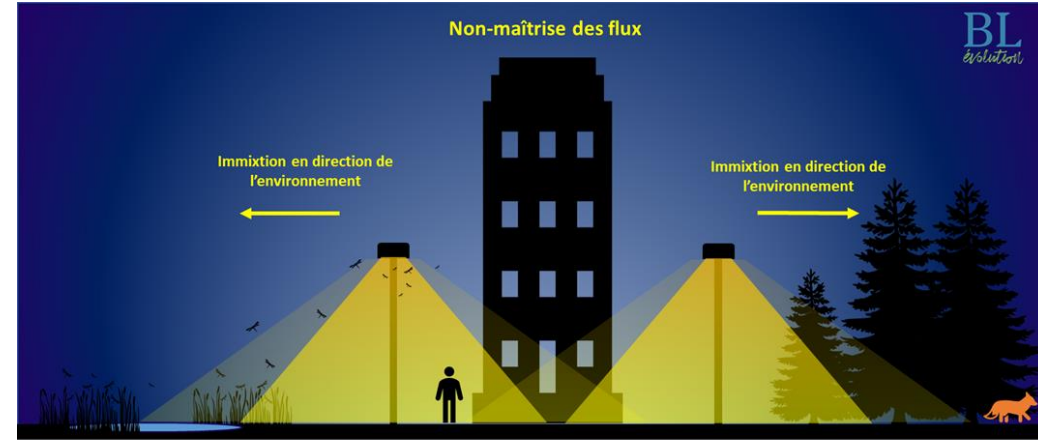
Eclairer en direction du sol



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

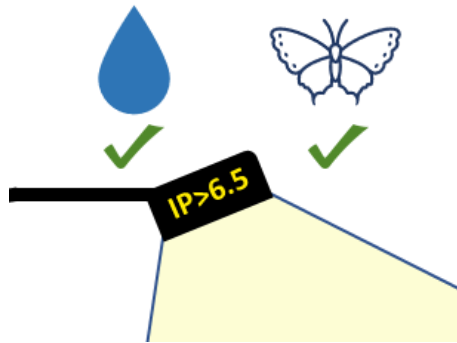


Eclairer uniquement à l'intérieur de l'enceinte

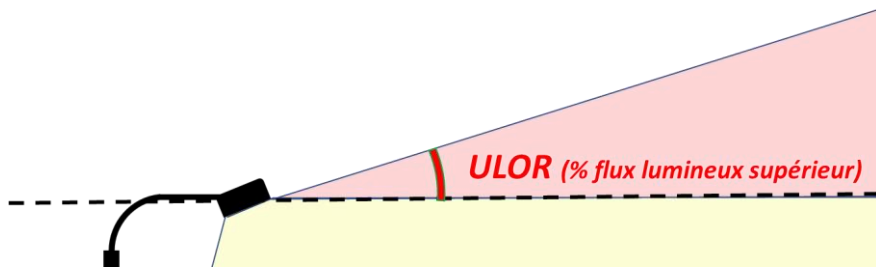


Préconisations techniques d'éclairage

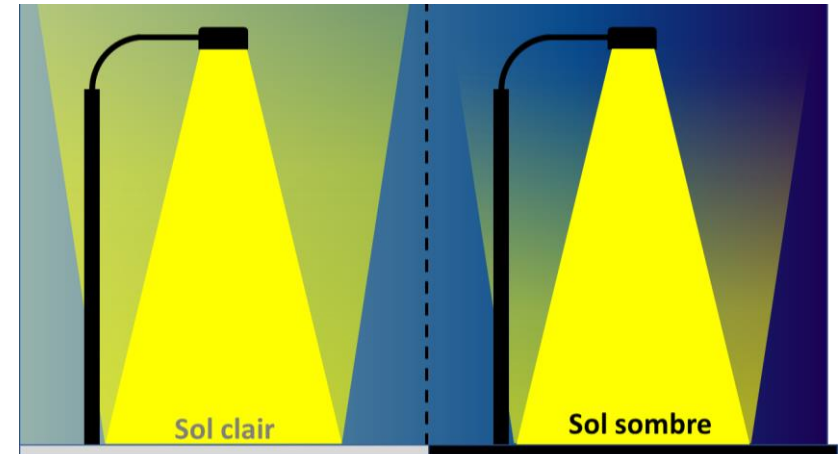
Utiliser un verre de protection lampadaire avec un indice de protection (IP) supérieur à 6.5 (résistant à l'infiltration d'eau, de poussières et donc d'insectes)



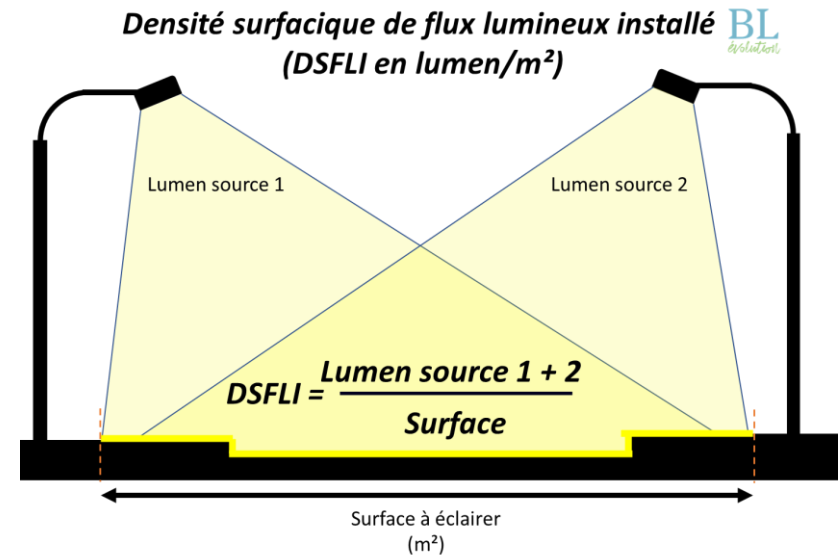
Utiliser un ULOR à 0%. Ce ratio est présent sur chaque fiche descriptive de tout lampadaire. Il exprime (en %) la fraction de flux émis vers le ciel par la source lumineuse (angle de flux total perdu par immixtion)



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.

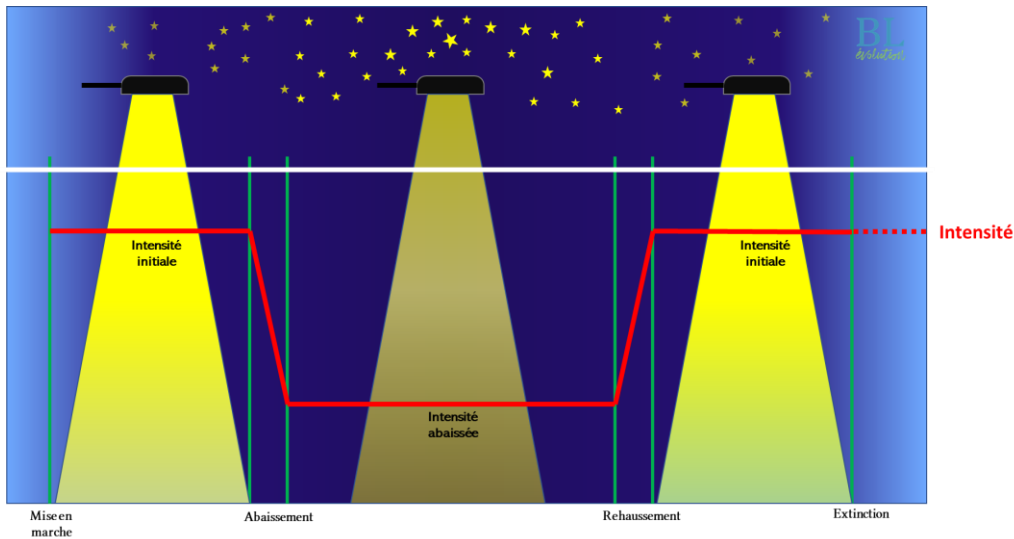


Limitier la densité surfacique de flux lumineux installé

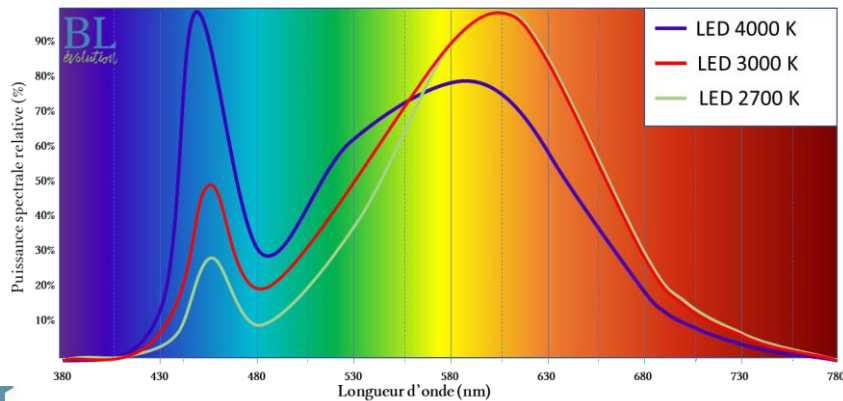


Préconisations techniques d'éclairage

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 égale à 2700K

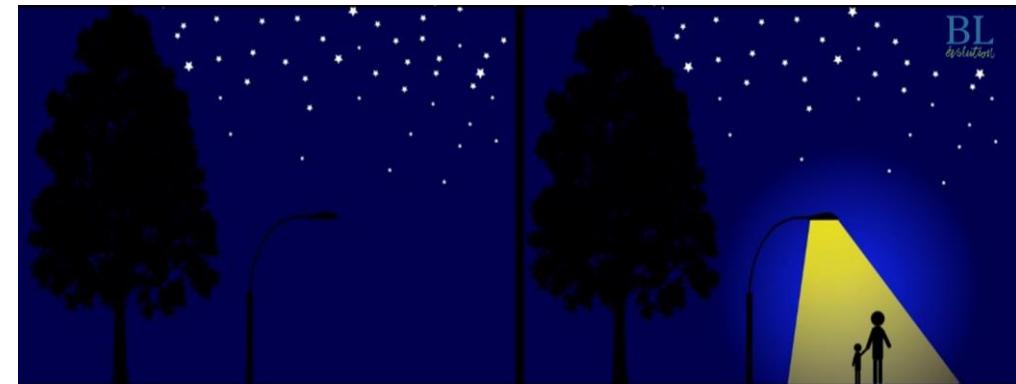


Limitier les puissances installées en portant attention aux meilleurs rendement lumineux

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

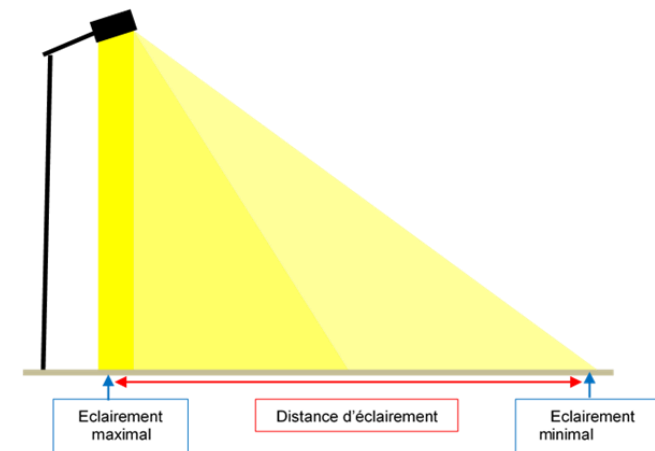
L'objectif de cette phase est de recenser l'ensemble des points lumineux au sein du périmètre et de les localiser grâce à un GPS afin de faciliter la modélisation. Seuls les éclairages du domaine public ont fait l'objet d'une analyse

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.

