



ETUDE POLLUTION LUMINEUSE
Site de Crisenoy



<u>Introduction</u>	Page 03
• La pollution lumineuse et ses enjeux	Page 04
• La méthodologie de l'étude	Page 10
• Le contexte du projet	Page 15
<u>L'état initial de l'environnement nocturne</u>	Page 19
• Analyse de données	Page 20
• Analyse des enjeux à l'état initial	Page 26
• Conclusion de l'état initial de l'environnement nocturne	Page 33
<u>Scénario et modélisation prédictive</u>	Page 34
• Modélisations prédictives	Page 35
• Conclusions sur les simulations des projets	Page 41
<u>Les effets probables de l'impact des projets sur l'environnement nocturne</u>	Page 42
• Etude des impacts des projets	Page 43
• Conclusion des impacts des projets	Page 59
• Les mesures correctrices	Page 60
<u>Préconisations et recommandations</u>	Page 67
<u>Annexes</u>	Page 71

Introduction

La pollution lumineuse et ses enjeux



Qu'est ce que la pollution lumineuse

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

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

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

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

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

Le rythme nyctéméral qui conditionne la vie sur Terre :

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

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

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

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



Les causes de production de pollution lumineuse

Des paramètres aux effets différents :

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

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

Plusieurs types de pollution lumineuse :

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

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

Les paramètres influençant la pollution lumineuse

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

1. L'orientation des flux :

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

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

2. La couleur des flux :

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



Les causes de production de pollution lumineuse

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

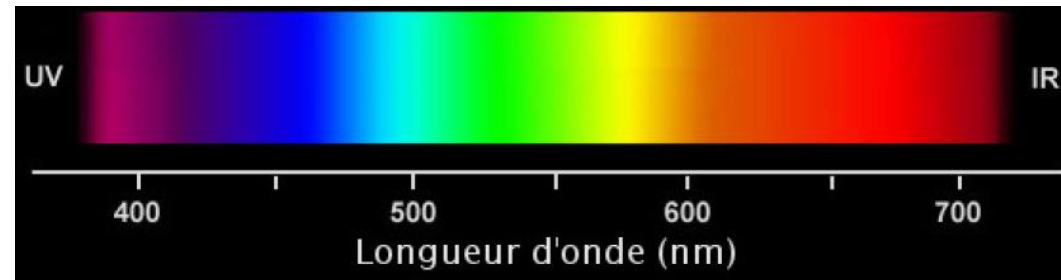
Si la majorité des taxons sont sensibles aux courtes longueurs d'ondes, il est cependant important de noter que la réponse des espèces n'est pas uniforme à cette question de couleur de flux. Certaines sont plus sensibles aux couleurs chaudes qu'aux couleurs froides. Pour cela, un tableau par taxon a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

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

3. L'intensité et la réverbération :

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

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



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



4. Autres facteurs de pollution lumineuse

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

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



Les principaux impacts de la pollution lumineuse :

Les impacts écologiques :

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

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

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

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

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

Impacts sanitaires :

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

Impacts sur le ciel étoilé :

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

Impacts sur le gaspillage énergétique et changement climatique :

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

La méthodologie de l'étude



La méthodologie déployée s'appuie sur 4 grandes phases :

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

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

Informations complémentaires par rapport à la méthode :

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

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

Elaboration de l'état initial :

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

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

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



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 :

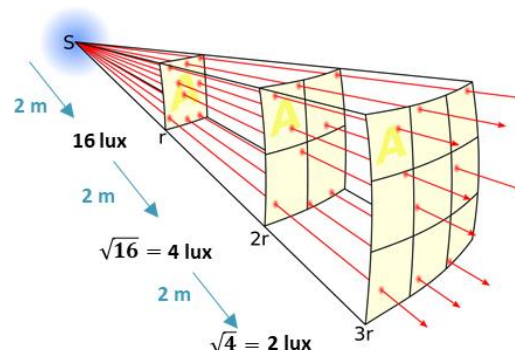
Les principales données utilisées pour comprendre la pollution directe sont le flux lumineux et l'éclairement.

- **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 :

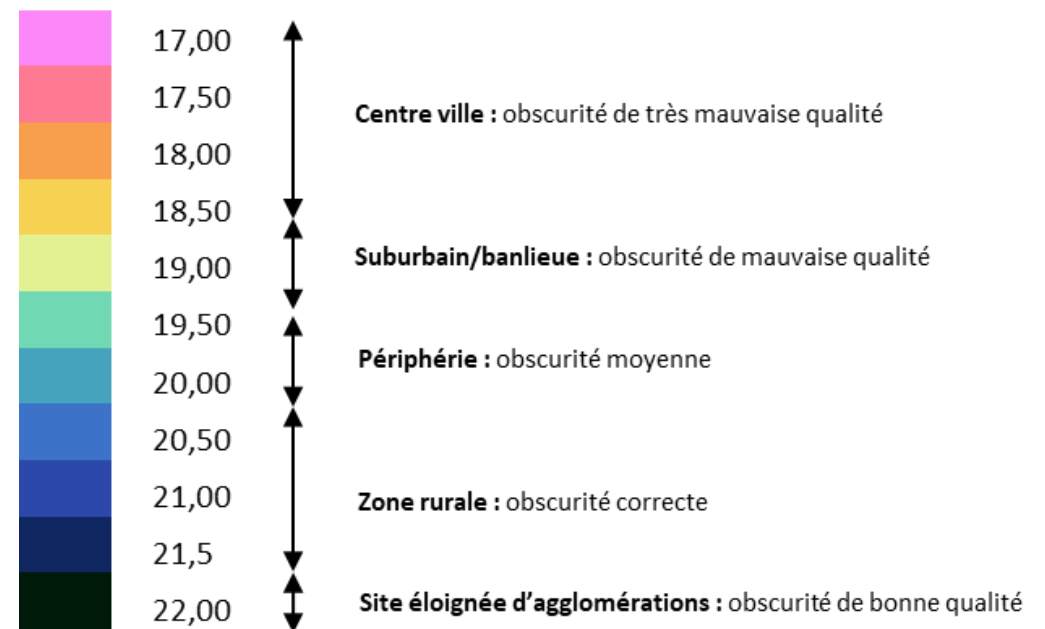
- **La radiance** : La radiance (ou luminance énergétique) est la puissance par unité de surface d'un rayonnement lumineux, dans un angle solide (en stéradian ou sr), émis en un point. Ce qu'il faut en comprendre c'est qu'il s'agit cette fois d'une mesure d'énergie et non d'une *grandeur photométrique*. 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.



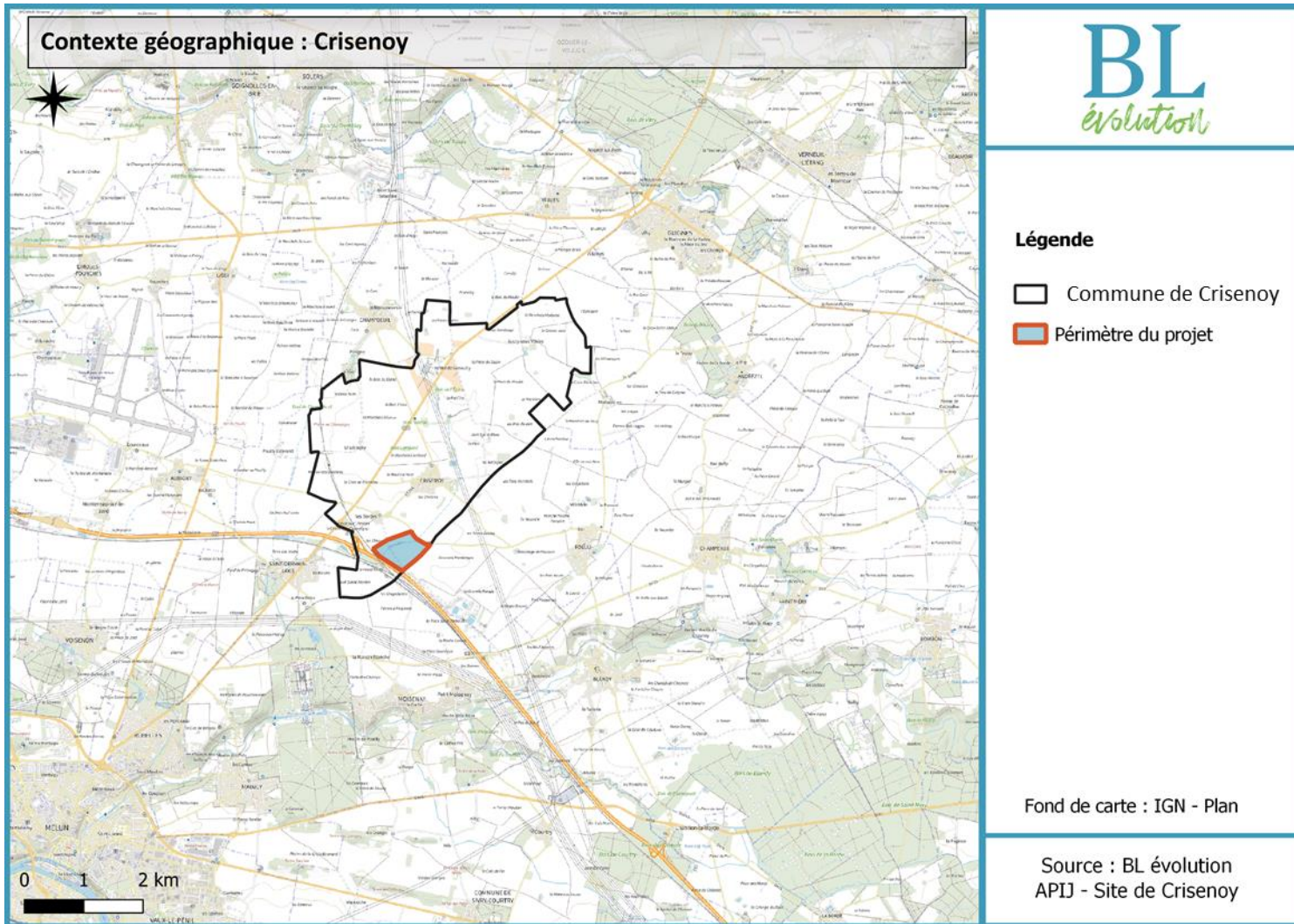
- La **magnitude par arc seconde** : peut-être la plus complexe des mesures, la magnitude par arc seconde est une donnée issue de l'astrophysique, qui correspond à une mesure de la *brillance d'une surface* d'un corps céleste et qui désigne la densité de flux reçue par unité d'angle solide. **Il faut 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 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 :



Le contexte du projet

Contexte du site étudié



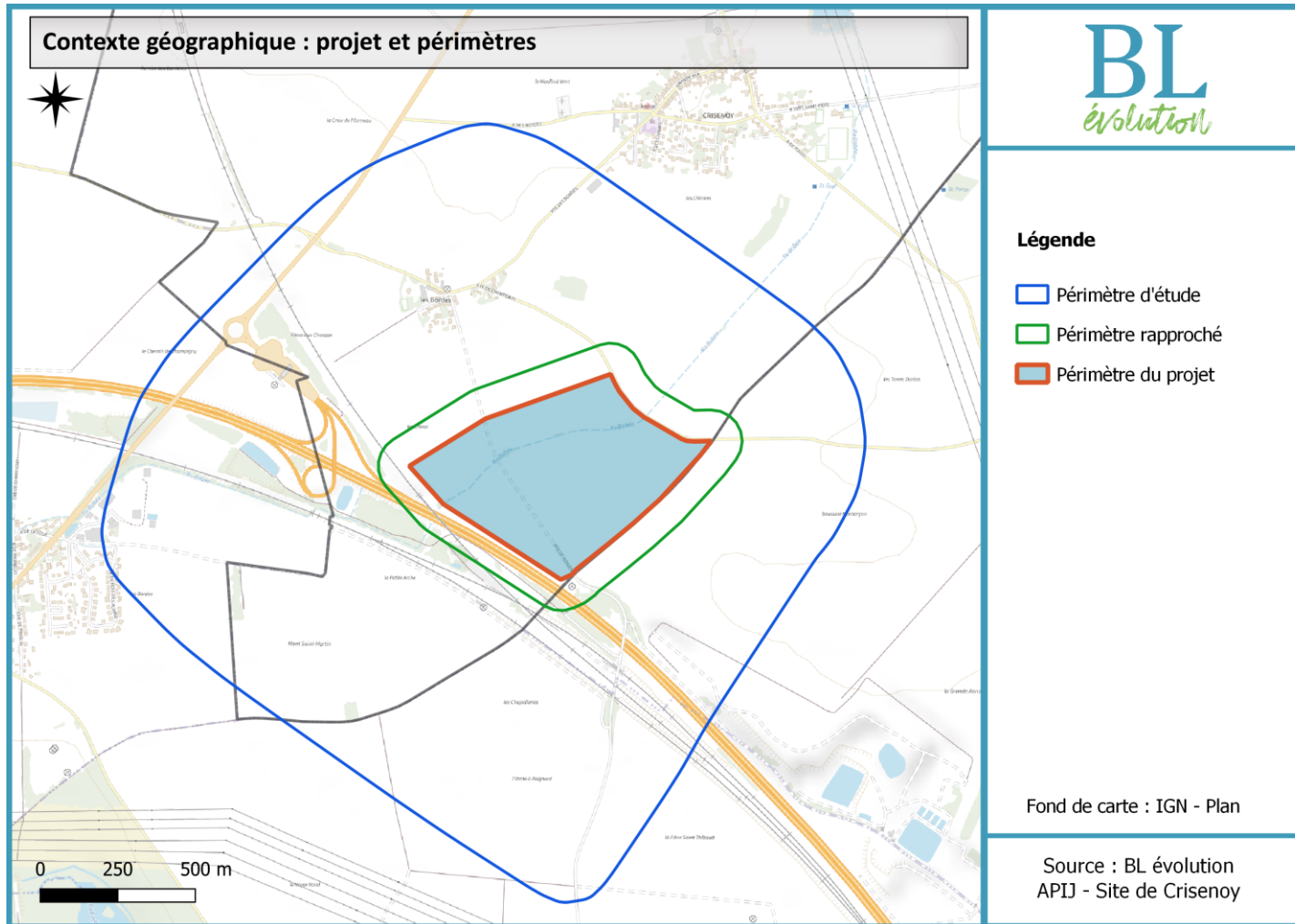
Ce travail entre dans le cadre de l'étude d'impact commandée par l'APIJ (Agence Publique pour l'Immobilier de la Justice). *BL évolution* a été sollicité pour étudier l'influence du futur projet sur l'environnement nocturne local dans le cadre de la production de pollution lumineuse. Cette étude se justifie avant tout par le fait que l'éclairage est une obligation réglementaire au sein des établissements pénitentiaires et par conséquent producteurs potentiels d'impacts sur la biodiversité et la santé humaine.

Ce site se localise au sud de la commune de Crisenoy, à proximité de l'autoroute A5 et de l'échangeur. Il se situe à 7km au nord de Melun, à 1,2 km du centre-ville de Crisenoy et à 500 mètres environ du hameau des Bordes.

Le site d'étude est occupé par des parcelles agricoles vouées à une production essentiellement céréalière.

Le périmètre du projet s'inscrit dans une superficie d'environ 32 ha.

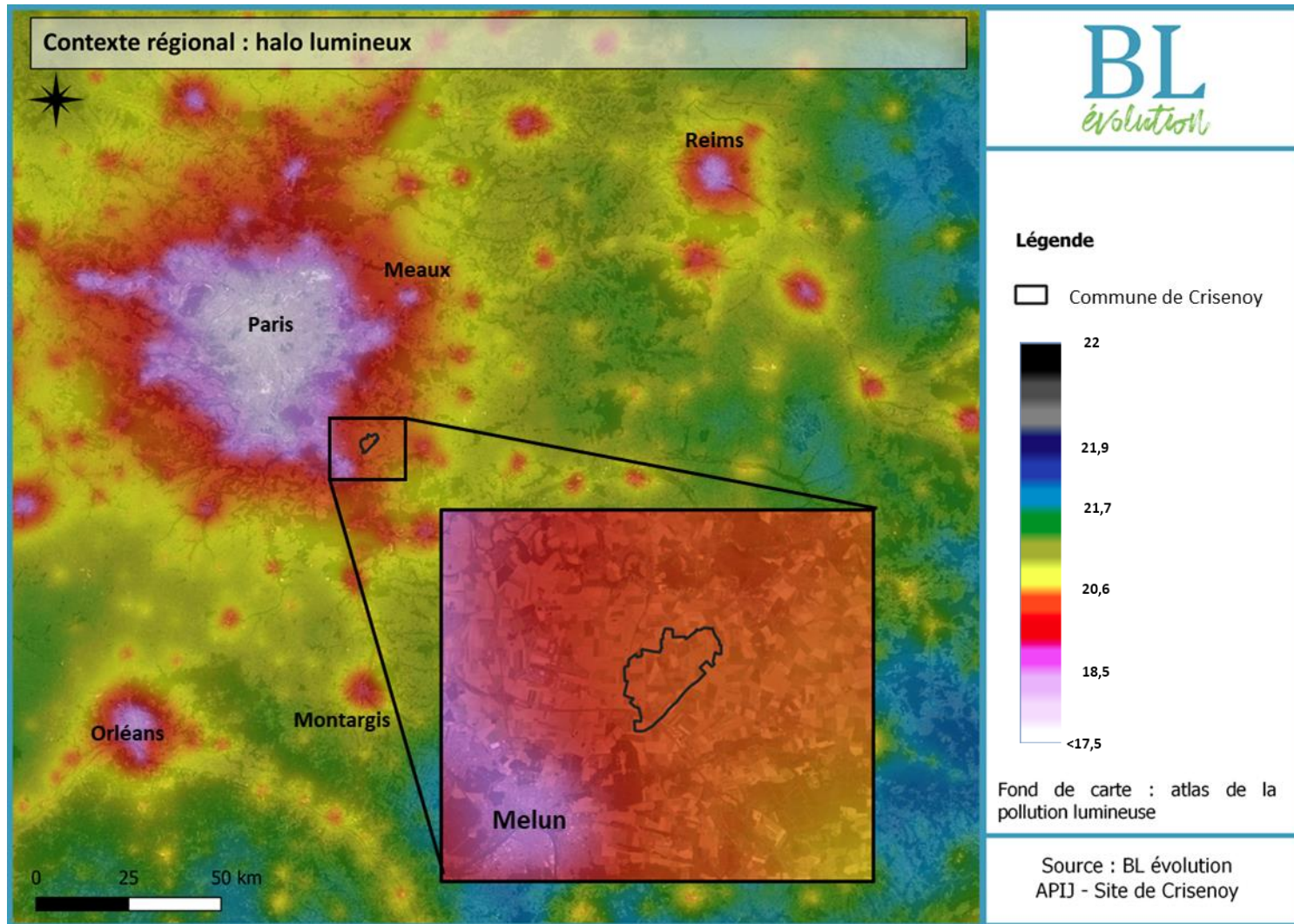
Définition des périmètres



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 du site d'étude transmis en amont et analysé dans le présent document.
- Périmètre rapproché : le périmètre rapproché est un tampon de 100 mètres au-delà du périmètre défini pour le projet.
- Périmètre d'étude : ce périmètre élargi correspond à la zone où sera étudiée la qualité de l'obscurité. En effet, 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 dizaines de kilomètres autour d'une zone urbaine. Cela motive donc une prise en compte élargie qui est définie pour être cohérente avec l'installation d'un bâtiment.

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 du halo lumineux des agglomérations alentours.

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

La présente étude va permettre une analyse beaucoup plus locale et précise du phénomène, néanmoins, la carte permet de distinguer l'influence majeure du halo lumineux de l'agglomération parisienne qui s'affaiblit en direction de l'est. La commune de Crisenoy est toujours très concernée par ce halo. La magnitude se situe autour de 19,5-20 mag.arcsec⁻².

L'agglomération parisienne montre une pollution lumineuse globale qui s'étale au-delà de ses limites. S'ajoute à cela, plusieurs communes proches de Crisenoy qui participent à ce halo lumineux global, comme la ville de Melun qui montre une influence importante venant du sud du territoire.

L'état initial de l'environnement nocturne

Analyse des données

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 fournie plus avant 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 25m² (maille de 5m par 5m) 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.

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

Les éclairages les plus proches se situent dans la petite agglomération des Bordes. Au sein de ce hameau, plusieurs lampadaires sont présents mais se limitent à l'intérieur de la zone urbanisée, notamment au niveau du croisement de la Route de Champeaux, de la rue du Moisenay et celle des Bordes qui permet de rejoindre le centre-bourg de Crisenoy. Aucun point lumineux n'est présent au sein du périmètre rapproché et les éclairages de l'urbanisation de Bordes n'ont pas d'influence directe sur les limites du projet.

Au sud du territoire d'étude, quelques éclairages sont présents au niveau de l'échangeur de l'autoroute A5. L'autoroute et le terrain d'étude sont séparés par un talus qui accueille la voie ferrée. Ainsi, aucun éclairage n'est présent dans le périmètre rapproché et le talus de la voie ferrée bloque le potentiel d'éclairement provenant du diffuseur autoroutier.

Le périmètre d'étude est totalement épargné par la pollution lumineuse directe à l'état initial.

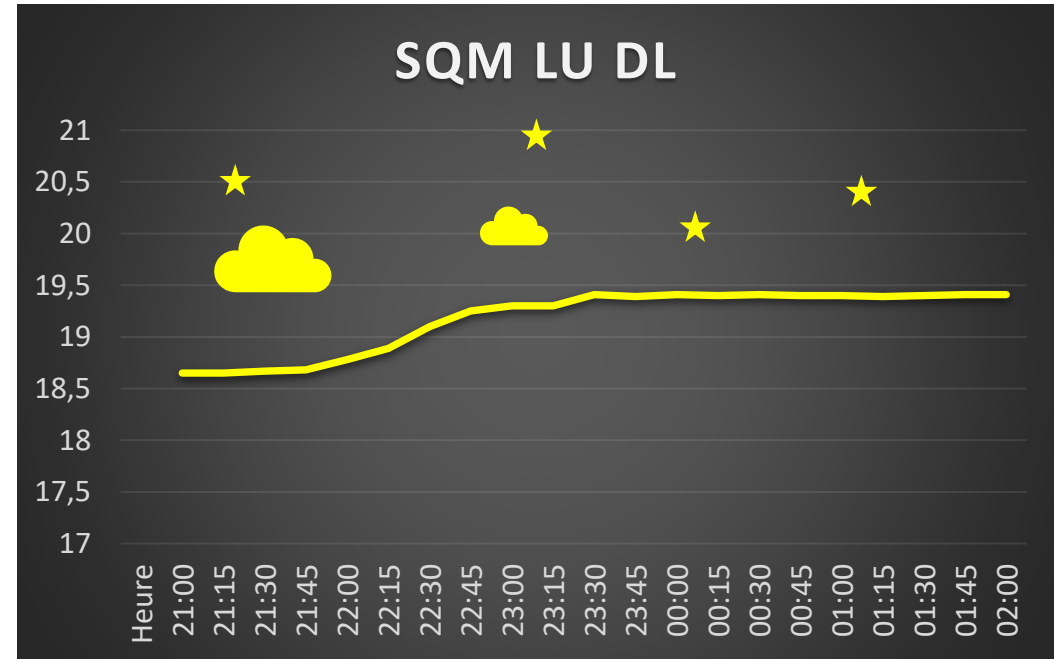
Pollution lumineuse indirecte : définition d'une situation de référence

Pour étudier la pollution lumineuse indirecte, une campagne de mesure a été menée avec un appareil SQM. 17 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 ponctuelle sur des zones préalablement sélectionnées.
- Une donnée continue : un appareil (SQM LU-DL) fait une prise continue d'informations durant toute la période de mesure.

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 du ciel 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 qui peut perturber ponctuellement les mesures prises.

Les résultats de la prise longue va 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.



Situation de référence

Le graphique ci-contre reprend l'évolution de la qualité de l'obscurité durant toute la période de collecte effectuée à Crisenoy la nuit du 01/03/2022. La collecte de données a démarré à partir de 21h00 et s'est terminée aux alentours de 2h00 du matin. La situation a été perturbée par la présence de nuages en début de nuit, qui s'est ensuite levé autour de 23h.

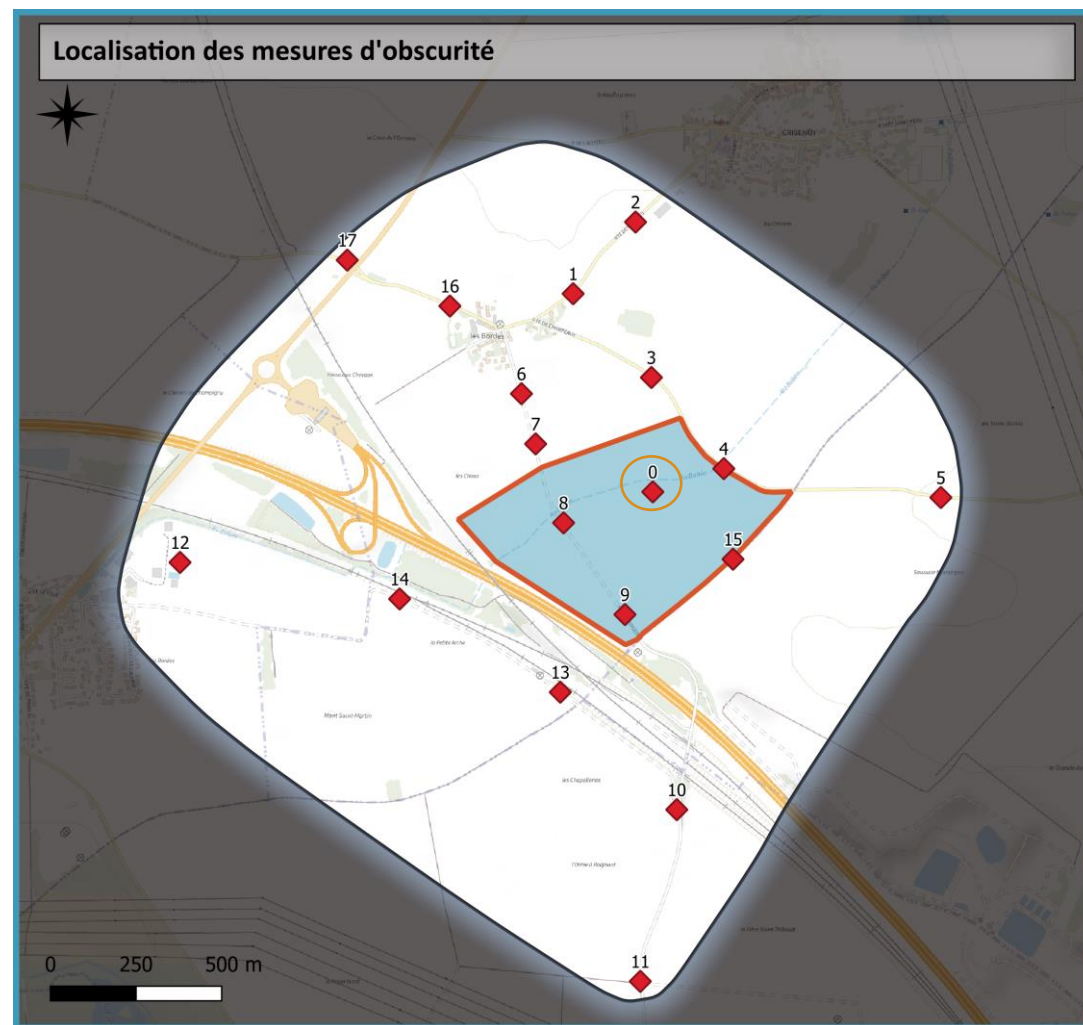
Au final, la magnitude retenue pour ce point de mesure est de 19,41, identifiée comme la « normale ». Durant la période inférieure à la situation de référence, le différentiel entre les mesures et la « normale » a pu s'élever jusqu'à 0,76 mag./arcsec². Des ajustements sur les mesures de début de nuit ont été réalisés.

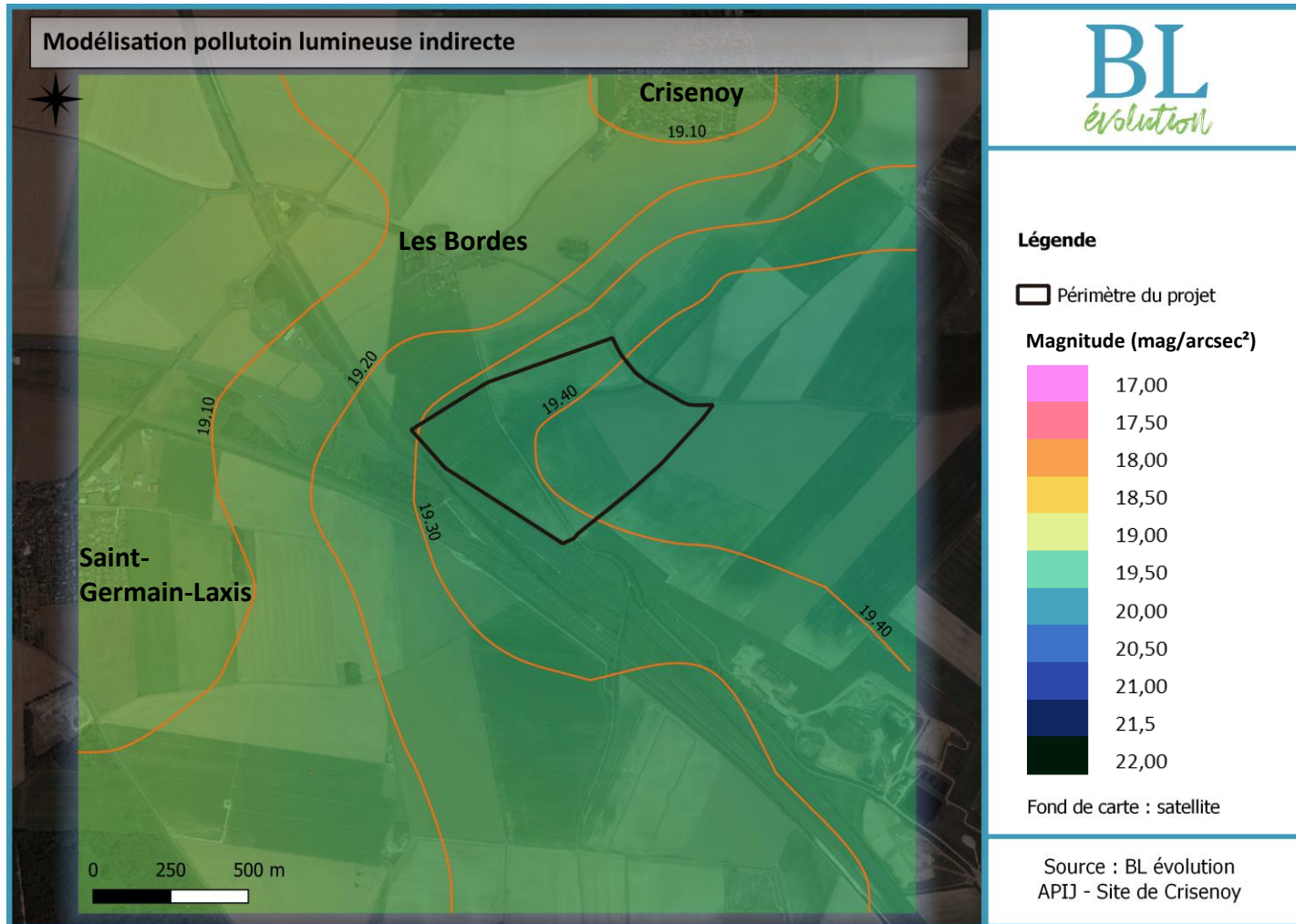
Données d'obscurité récoltées

Les données suivantes sont les résultats de la collecte ponctuelle. Chaque point de mesure à fait l'objet d'un renseignement de l'horaire (données issues du pointage GPS effectué). La dernière colonne présente les données réajustées, retenues pour l'étude :

ID	Mesures brutes	Réajustement	Mesures retenues
1	18,34	-0,76	19,10
2	18,39	-0,63	19,02
3	18,78	-0,52	19,30
4	19,09	-0,31	19,40
5	19,29	-0,16	19,45
6	19,04	-0,11	19,15
7	19,19	-0,11	19,30
8	19,38	-0,02	19,40
9	19,39	0,00	19,39
10	19,30	0,00	19,30
11	19,20	0,00	19,20
12	19,04	0,00	19,04
13	19,39	0,00	19,39
14	19,29	0,00	19,29
15	19,42	0,00	19,42
16	19,10	0,00	19,10
17	18,95	0,00	18,95
LU DL (0)		19,41	

Carte des points de mesures :





Carte de la modélisation de l'obscurité

La modélisation du halo lumineux local montre une qualité d'obscurité du ciel oscillant entre 19,10 mag/arcsec² à l'ouest du territoire et 19,50 mag/arcsec² à l'est. Il s'agit d'un ciel typique des zones proches de grandes agglomérations.

Le halo lumineux sur le territoire d'étude s'améliore en direction de l'est, mais la qualité de l'obscurité du ciel reste globalement altérée sur toute la zone.

La qualité de l'obscurité sur le territoire d'étude est touchée directement au sud par l'agglomération de Melun, malgré sa distance, et à l'ouest par la halo lumineux global de la région parisienne et les unités urbaines proches.

On notera qu'au nord, Crisenoy et le hameau des Bordes ont une influence assez peu significative. Cela s'explique par le fait qu'il s'agit de petites agglomérations avec peu de sources de lumière.

L'agglomération de Saint-Germain-Laxis à l'ouest du territoire d'étude montre aussi une influence modérée.

Le point important à retenir : l'obscurité est d'une qualité modérée à mauvaise, principalement à cause du halo lumineux global de la région parisienne.

Modélisation du halo lumineux

Méthodologie et interprétation

La modélisation du halo lumineux, ou citée pollution lumineuse indirecte, correspond donc à la retranscription des données de qualité d'obscurité du ciel 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).

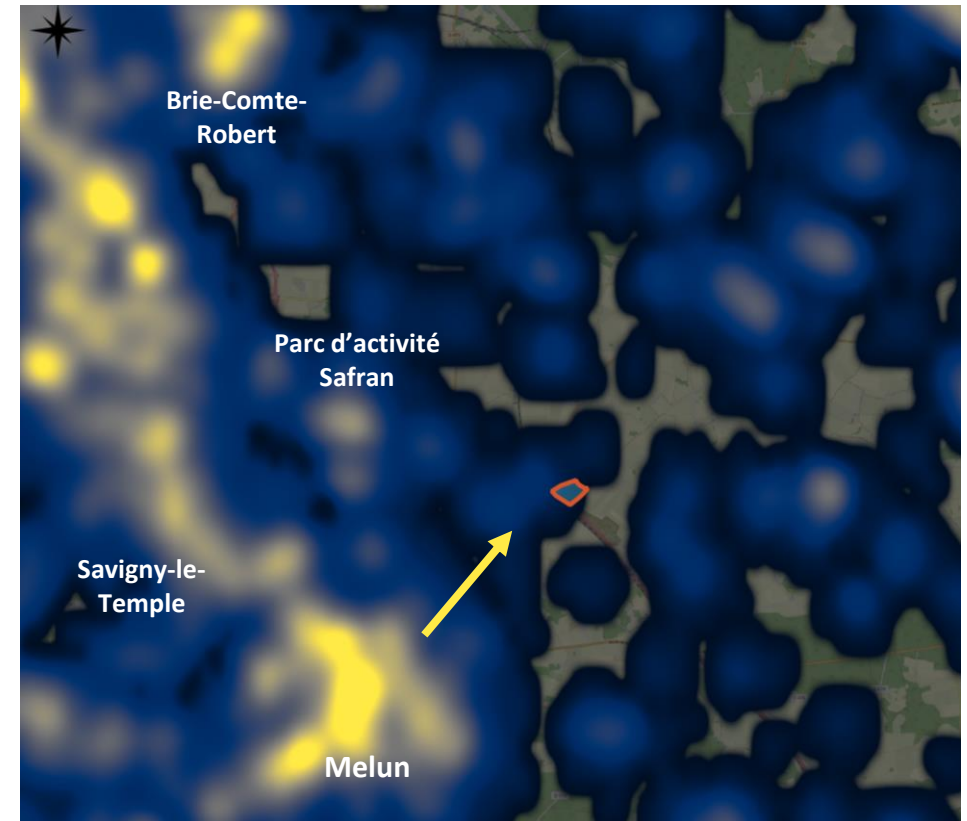
Une méthode permettant de définir des données entre les points de mesures tenant compte de l'influence (poids) des points adjacents.

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 du satellite VIIRS.

Le site connaît une altération locale de son obscurité par la présence de l'agglomération de Melun. Les agglomérations proches disposent d'une radiance captée par le satellite qui reste peu élevée.

Cela confirme que la principale source d'altération de l'obscurité sur le territoire d'étude s'explique ainsi par **un halo lumineux global venant des grandes agglomérations**, même si celles-ci peuvent se trouver à une distance importante. Ce qui crée une ambiance lumineuse continue touchant le territoire qui altère la qualité de l'obscurité et cela même sans éclairage et des petites zones urbaines proches.



Analyses des enjeux à l'état initial

Enjeux écologique :

L'état initial s'appuie sur les documents transmis dans le cadre de la mission. Les documents étudiés sont les suivants :

- Etude de faisabilité M1 : CONSTRUCTION D'UN ÉTABLISSEMENT PÉNITENTIAIRE MAISON D'ARRÊT DE CRISENOY (77) SITE DE CRISENOY.
- Diagnostic faune, flore et habitats, analyse des impacts et mesures ; rapport final mars 2023 (Alisea)

Pour établir un état initial de l'environnement nocturne, nous nous intéressons à la question des impacts sur la biodiversité et des impacts sur la santé humaine. Dans ce sens, l'analyse des enjeux s'appuie sur l'étude écologique établie pour le projet ainsi que sur l'étude de l'habitat proche.

Au sein de cette première partie, une première définition des enjeux est établie pour rendre compte des potentiels impacts. Ces enjeux traitent dans un premier temps de la biodiversité puis de la santé et du bien-être humain.

Afin d'établir l'état initial, il est recherché l'identification des enjeux spatialisés des habitats, des zonages réglementaires et de mettre en avant les commentaires quant aux espèces à proximité du projet.

Enjeux humains :

Concernant les enjeux humains, nous cherchons notamment à appréhender la présence d'habitations au sein de l'aire d'étude. Cette démarche est établie pour estimer l'enjeu de la pollution lumineuse sur la santé humaine qui implique notamment des nuisances sur la qualité de vie et le sommeil.

Pour cette étude, l'objectif est d'identifier les habitations qui sont présentes et qui seront potentiellement touchées. Dans ce sens, le traitement consiste à recouper les données carroyées de l'INSEE (Filosofi) qui localisent le nombre de foyers et les bâtiments issus des données de l'IGN (BD TOPO Bâti). On notera que la BD topo bâti ne différencie pas les bâtiments par type (local commercial, ateliers industriels, maisons...), il s'agit donc d'une estimation.

Enjeux issus de l'étude de faisabilité :

Les données transmises pour la réalisation de l'étude de pollution lumineuse sont issues de la bibliographie et une étude 4 saisons qui été menée dans le cadre de l'étude d'impact du projet d'établissement pénitentiaire, ainsi que les inventaires menés, présents dans le rapport. Les principaux enjeux s'orientent autour de la présence du ru d'Andy, seul habitat considéré comme un enjeu moyen.

Les enjeux, cette fois faunistiques, vont concerner la présence d'oiseaux du cortège des milieux agricoles et du milieu bocager à proximité du ru d'Andy. En particulier le Bruant jaune (enjeu fort) et la Linotte mélodieuse (enjeu modéré). Les chiroptères représentent aussi un enjeu important, notamment par la présence du ru d'Andy qui pourrait constituer un corridor de transit. Deux espèces de chiroptère ont pu être contactées.

D'autres espèces ont pu être rencontrées. On notera la présence de reptiles, d'oiseaux et de mammifères.

Taxons	Caractéristiques	Enjeux retenu	Enjeux de pollution lumineuse (réponse des espèces)
Invertébrés	Habitats peu favorables	Faible	Fort (invertébrés nocturnes)
Amphibiens	Aucune espèce recensée, mais présence du ru d'Andy	Faible	Modéré
Reptiles	Un espèce potentiellement présente et protégée au niveau national	Faible	Mal connu
Oiseaux	71 espèces d'oiseaux recensées (27 en période de nidification, 25 en période de migration et 19 en période d'hivernage).	Très fort	Fort
Chiroptères	2 espèce recensées et le ru d'Andy peut représenter un corridor de transit.	Modéré	Fort
Mammifères	Espèces communes recensées dont le hérisson commun (espèce protégée)	Faible	Faible

Ce premier travail permet de mettre en avant des enjeux qui sont plutôt orientés sur la question de l'avifaune, des chiroptères et des mammifères.

Analyse des enjeux faunistiques

Les données transmises impliquent la présence plusieurs espèces pouvant potentiellement être présentes sur le territoire d'étude. Pour chacune des espèces remarquables identifiées, nous analysons la connaissance bibliographique des enjeux de pollution lumineuse.

Groupe	Principales espèces identifiées	Comportement et connaissances	Remarques par rapport à la pollution lumineuse
Avifaune	Bruant jaune	Espèce diurne	Espèces représentant peu d'enjeu sur le comportement. La nidification peut se faire dans des espaces cachés des prédateurs et donc loin des flux lumineux direct. L'éclairage direct peut potentiellement limiter ou déplacer la nidification.
	Linotte mélodieuse	Espèce diurne	
	Busard Saint Martin	Espèce à dominante diurne, visible parfois en période crépusculaire pour rejoindre son nid	
	Milan noir	Espèce diurne	
	Alouette des champs	Espèce diurne mais migration nocturne	La migration nocturne est altérée par la présence d'éclairages artificiels et de halo lumineux. L'alouette et l'ensemble des oiseaux migrateurs potentiellement présents représentent un enjeu
	<i>Autres espèces d'oiseaux</i>	<i>L'avifaune, surtout migratrice est sensible à la pollution lumineuse</i>	<i>La migration nocturne est altérée par la présence d'éclairages artificiels et de halo lumineux. La Seine-et-Marne est globalement identifiée comme un couloir de migration.</i>
Insectes	Piéride des chou (Papillon diurne)	Pas d'activité nocturne	Aucun enjeu
Reptiles	Lézard des murailles (potentiel)	Pas d'activité nocturne	Aucun enjeu
Mammifères	Hérisson commun	Espèce semi-nocturne (chasse et déplacements)	La présence de lumière directe peut diminuer leur activités et vont fuir la lumière directe pour échapper aux prédateurs. La pollution lumineuse directe représente un enjeu faible
	Le Chevreuil européen, le Lapin de Garenne, le Lièvre d'Europe et le Ragondin.	<i>Espèces semi-nocturne</i>	Ces autres espèces de mammifères peuvent potentiellement être touchés par la pollution lumineuse directe. L'enjeu reste faible pour ces espèces.
Chiroptères	Pipistrelle commune	Espèce nocturne	L'éclairage semble favoriser sa présence pour chasser, altérant les équilibres proies/prédateurs. La présence d'éclairage représente un enjeu important
	Pipistrelle commune	Espèce nocturne	Comme la pipistrelle commune, la pipistrelle de Khul s'adapte à la présence d'éclairage, mais une mise en lumière peut modifier l'équilibre proies/prédateurs, avec un enjeu important.

Patrimoine naturel:

Le site n'est pas couvert par des zonages de protection ou d'inventaire du patrimoine naturel.

Le site Natura 2000 le plus proche correspond au massif de Fontainebleau, désigné au titre des directives « Habitats » et « Oiseaux ». Il se trouve à un peu plus de 10 km au sud-ouest du site.

La forêt de Fontainebleau est réputée pour sa remarquable biodiversité animale et végétale. Ainsi, elle abrite la faune d'arthropodes la plus riche d'Europe (3 300 espèces de coléoptères, 1 200 de lépidoptères) ainsi qu'une soixantaine d'espèces végétales protégées. Beaucoup d'espèces sont rares dans la plaine française et en limite d'aire. Le massif est célèbre pour les platières gréseuses, les chaos de grès, les landes, les pelouses calcaires et sablo-calcaires, les chênaies pubescentes, les hêtraies...

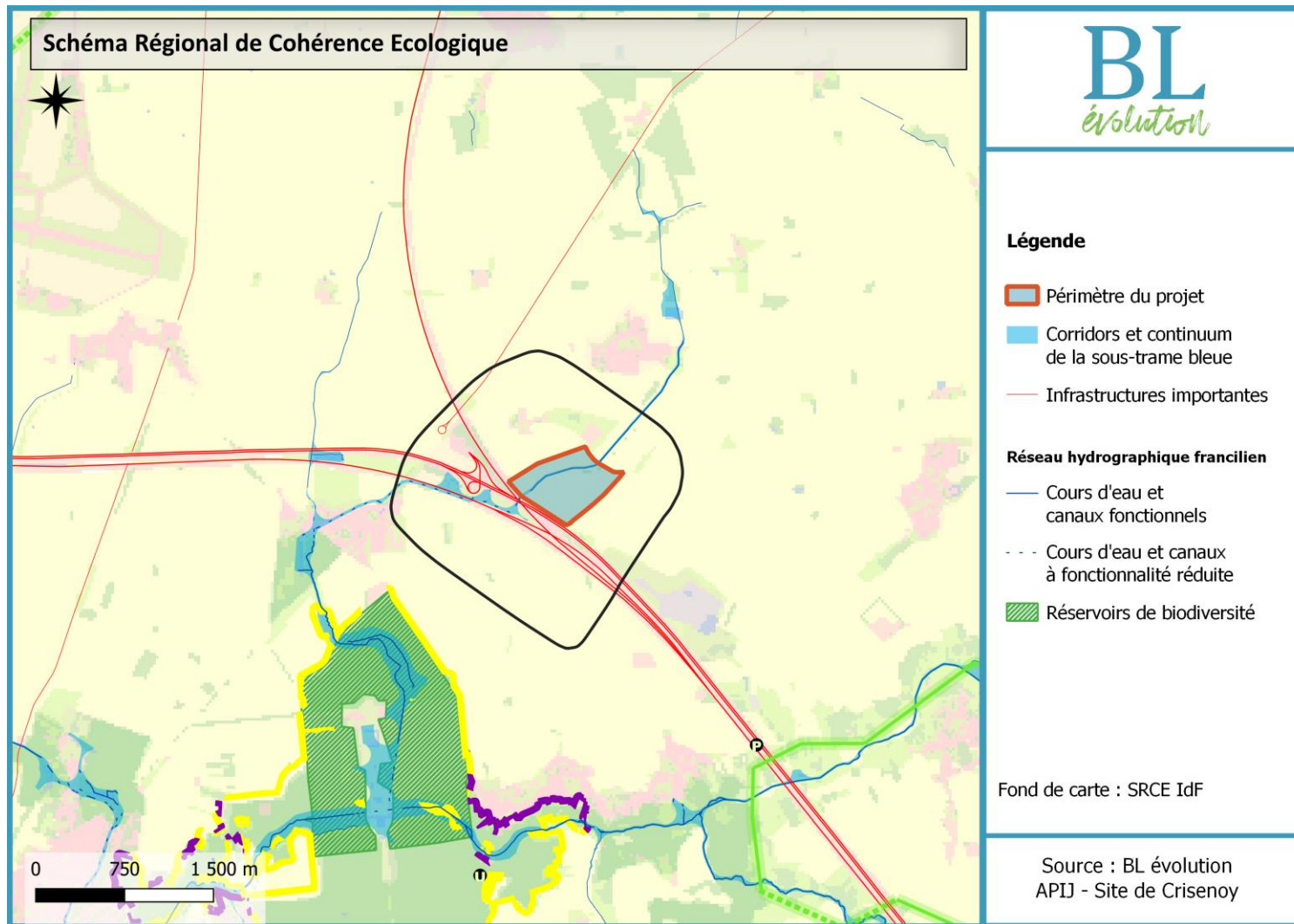
Aucune ZNIEFF n'est présente à proximité du site. Les plus proches sont les suivantes :

- la ZNIEFF de type 1 « Buisson de Massoury » à environ 7,8 km au sud ; l'intérêt du site provient des nombreuses mares tourbeuses, et le Buisson de Massoury montre une mosaïque de milieux qui hébergent une flore remarquable.
- la ZNIEFF de type 1 « Les Bordes chalongues » à environ 9 km au sud-est, site intéressant comprenant des zones boisées et des zones humides de qualité (mares forestières, prairies humides en lien avec le ru).
- la ZNIEFF de type 2 « Buisson de Massoury » à environ 7,8 km au sud, site d'intérêt majeur pour l'Ile-de-France sur le plan floristique, abritant un ensemble de mares tourbeuses inventoriées en ZNIEFF de type 1.;
- la ZNIEFF de type 2 « Bois de Bréviande » à environ 8,2 km au sud-ouest, les habitats déterminants étant les landes humides et sèches et les espèces déterminantes des coléoptères et des papillons

Une réserve naturelle régionale (RNR) est une aire protégée faisant partie des réserves naturelles en France et dont le statut est défini par la loi relative à la démocratie de proximité du 27 février 2002. C'est un outil de protection à long terme d'espaces, d'espèces ou d'objets géologiques.

Conclusion

Du point de vue de la pollution lumineuse, l'ensemble des sites patrimoniaux se situent à une distance importante et ne pourront subir des impacts issus de la pollution lumineuse directe et indirecte. **Aucun enjeu n'est retenu dans cette étude pour le patrimoine naturel.**



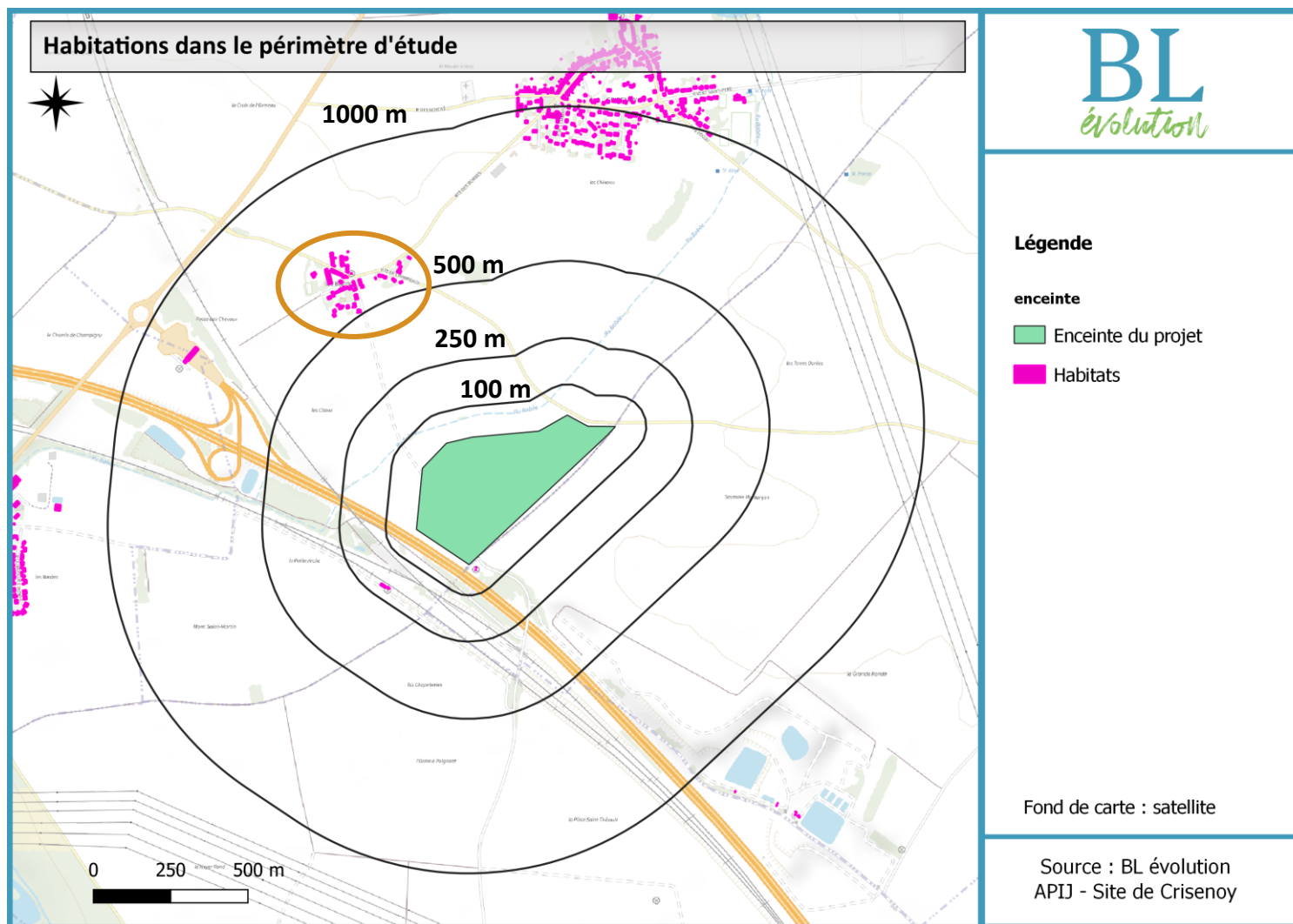
Le projet se situe au sein d'une cohérence écologique peu riche, on retrouve néanmoins un élément de cohérence :

- Corridors et continuum de la sous-trame bleue, qui correspond au ru d'Andy et sa ripisylve qui traverse directement le périmètre du projet.

Le territoire d'étude se situe au sein d'une unité de paysages agricoles. A noter la présence d'un important réservoir de biodiversité qui se situe au niveau du Château de Vaux-le-Vicomte avec son parc et son ensemble forestier qui l'entourent. Ce réservoir de biodiversité se situe à environ 1,5 km périmètre d'étude.

L'ensemble de la partie sud du territoire est délimitée par des infrastructures importantes qui limitent fortement la cohérence entre le nord et le sud. Il s'agit de l'A5 principalement.

Les principaux enjeux de cohérence se situent donc au niveau du ru d'Andy, qui correspond à un corridors et continuum de la sous-trame bleue. Pour le reste, le territoire d'étude reste enclavé en terme de cohérence par la présence d'importantes infrastructures routières.



La carte ci-contre présente les bâtiments accueillant des habitations et les bâtiments non-résidentiels.

Aucune habitations n'est présente au sein du périmètre du projet. (on notera la présence de bâtiments (non-résidentiels) au sud du projet.

Les premières habitations se situent à plus de 500 mètres, dans le hameau des Bordes.

Enfin le centre-bourg de Crisenoy, se situe à environ 1000 mètres du projet.

Les seuls enjeux se situent pour le hameau des Bordes, mais celui-ci reste relativement éloigné de l'enceinte bâtie du projet.

Les habitations représentent un enjeu faible.

Obscurité et lumière :

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

- Le site s'inscrit dans une zone sans lumière directe qui pourrait avoir une influence sur le périmètre d'étude. Les seuls éclairages à proximité restent à une distance importante et n'ont donc aucune influence sur le projet.
- La pollution lumineuse indirecte reste cependant un enjeu. En effet, le territoire se situe à l'intérieur de l'imposant halo lumineux de l'agglomération parisienne. On notera notamment une influence importante de la ville de Melun. Les zones urbaines à proximité, comme le centre-bourg de Crisenoy, ou le hameau des Bordes, ont une influence qui reste faible sur ce halo lumineux.
- Le projet s'inscrit dans une obscurité qui reste de mauvaise qualité, mais qui s'améliore en direction de l'est, en s'éloignant du halo lumineux global de la région parisienne.

Enjeux :

Les enjeux écologiques:

- L'enjeu principal se situe au niveau du Ru d'Andy. Celui-ci représente le principal habitat d'intérêt. Il est aussi identifié comme un corridor écologique de la sous-trame bleue et peut représenter un axe migratoire pertinent pour les chauves-souris.
- Concernant la flore, les enjeux sont identifiés comme faibles.
- Concernant la faune, les principaux enjeux s'orientent sur la présence d'oiseaux des chauves-souris. Ces espèces peuvent être plus ou moins sensibles à la lumière. On notera une prépondérance d'enjeu pour la pollution lumineuse directe, qui peut affecter les oiseaux et les chauves-souris. Les enjeux sont plutôt localisés sur la partie nord du ru d'Andy pour les chauves-souris. Les oiseaux sont présents sur l'ensemble de la matrice agricole et proche de la ripisylve du ru. Les mammifères sont présents sur l'ensemble des parcelles ouvertes.
- Plus généralement, les enjeux de halos lumineux semblent être moins prégnant, notamment au vu de la qualité de l'obscurité du ciel mesurée à l'état initial.

Enjeux humains :

Les premières habitations se situent à 500 mètres du projet. Ces habitations restent relativement éloignées pour représenter un enjeu important dans l'étude de la pollution lumineuse.

La scénarisation de la pollution lumineuse directe du projet permettra de confirmer cette première analyse des enjeux.

Scénario et modélisation prédictive

Modélisations prédictives

Principes :

La scénarisation est basée sur un scénario 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 projets sur l'environnement nocturne.

L'étude se déroule donc en deux temps :

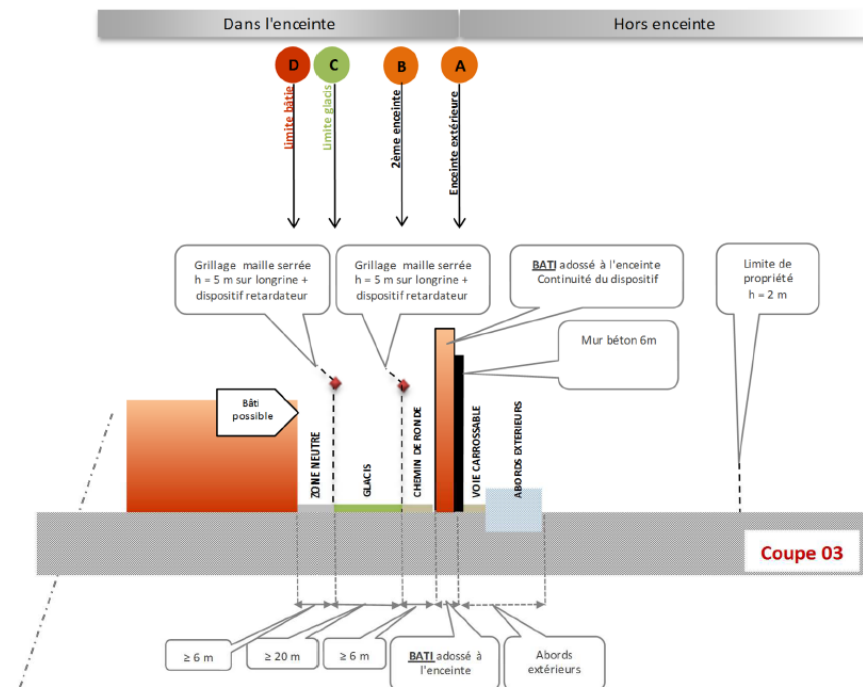
- 1. Modélisation de l'éclairage :** afin d'analyser la pollution lumineuse directe, une simulation d'éclairage au sol selon les différents espaces est réalisée à partir des données connues à ce jour et des exigences réglementaires. De plus, l'étude est complétée par un appui sur un scénario type d'éclairage 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 du ciel à l'état initial.

Pour l'étude de Crisenoy, plusieurs scénarios ont été proposés et on fait l'objet d'une étude. L'ensemble des éléments étudiés tendent à favoriser le scénario 3. C'est sur ce scénario qu'est établie l'étude de la pollution lumineuse et la modélisation prédictive.

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



Les exigences réglementaires et simulation d'éclairage :

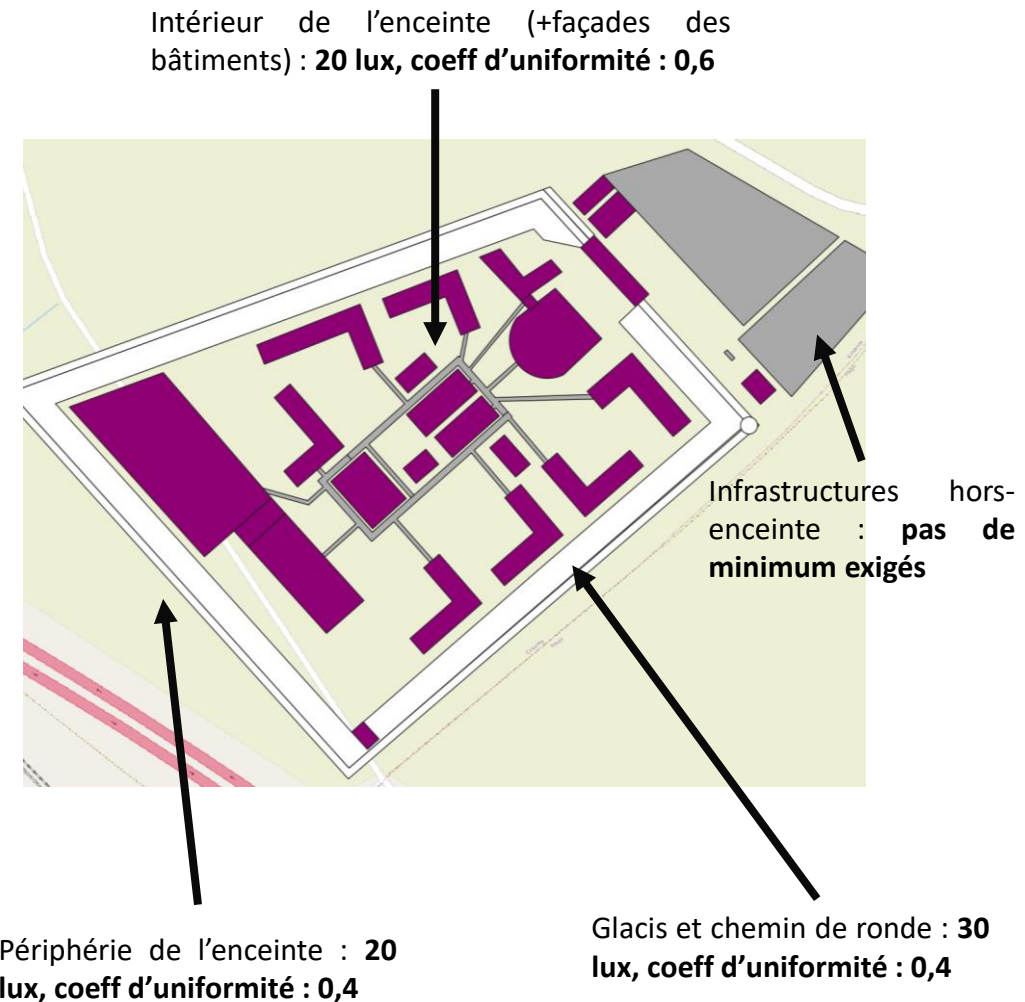
L'étude intervenant particulièrement en amont, la simulation d'éclairage s'appuie uniquement sur les exigences réglementaires transmises par l'APIJ. Ces exigences sont limitées à la définition d'un éclairage moyen ainsi qu'un coefficient d'uniformité. Ce coefficient (d) est le rapport en l'éclairage minimum (E_{min}) et l'éclairage moyen (E_{moy}) :

$$d = \frac{E_{min}}{E_{moy}}$$

Il permet de définir le niveau de confort visuel nécessaire, c'est-à-dire que plus il est élevé, les zones les plus 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).

Pour la zone hors-enceinte, celle-ci pourra potentiellement accueillir un chemin d'accès, des parkings et bâtiments divers qui ne sont pas soumis à des exigences particulières. Pour la modélisation de cette particularité, un éclairage moyen a été intégré dans la modélisation. Pour cela, il a été considéré 22 points lumineux répartis uniformément sur l'ensemble de ce périmètre.

Les exigences sur le projet :



Scénarisation d'éclairage

Pour modéliser l'éclairage, des éclairages potentiels ont été simulés à partir des limites et périmètres. Le modèle de calcul utilisé nécessite plusieurs données d'entrées :

- La hauteur des éclairages
- Leur puissance
- Le type d'ampoule
- L'angle de diffusion (ici des sources lambertiennes* ont été simulées pour ce projet)
- Leur localisation

Intervenant particulièrement en amont du projet, aucune de ces données ne sont connues au moment de la réalisation de cette étude. Ainsi les sources théoriques simulées doivent permettre de respecter les exigences réglementaires et sont toutes considérées comme répondant aux exigences nationales issues de l'arrêté sur la prévention, la réduction et la limitation des nuisances lumineuses du 27 décembre 2018.

Les éclairages imaginés :

Pour le scénario :

- A l'intérieur de l'enceinte bâtie. Il s'agit de la donnée la plus difficile à estimer. Ainsi il a été proposé **des points lumineux adossés aux bâtiments**, avec une hauteur de 6 mètres. Ces points sont répartis uniformément. Afin de parvenir à un résultat satisfaisant pour respecter les exigences réglementaires, il a été préféré un nombre de points conséquents avec une puissance faible (LED 35W).

- Chemin de ronde : 1 luminaire tous les 8 mètres, positionnés à 4 mètres de hauteur tout le long de l'enceinte. Une puissance modérée a été appliquée (LED 50W)
- Zone bâtie hors enceinte : reprend le principe de l'intérieur de l'enceinte bâtie.

Dans cette simulation, tous les éclairages sont considérés comme respectant l'arrêté. Ainsi aucun ULOR n'a été impliqué.

Interprétation :

L'éclairage à l'intérieur du projet est une simulation interprétée à partir des données règlementaires et de points lumineux intégrés au simulateur. Pour comprendre les effets de la pollution lumineuse, il est nécessaire de comprendre la diffusion de l'éclairage au-delà des limites bâties (qui font l'objet d'une étude écologique à part entière).

Ainsi, la simulation est complétée jusqu'à 0,1 lux. À ce stade, **l'éclairage est très peu perceptible par l'être humain, mais peut tout de même impacter certaines espèces.**

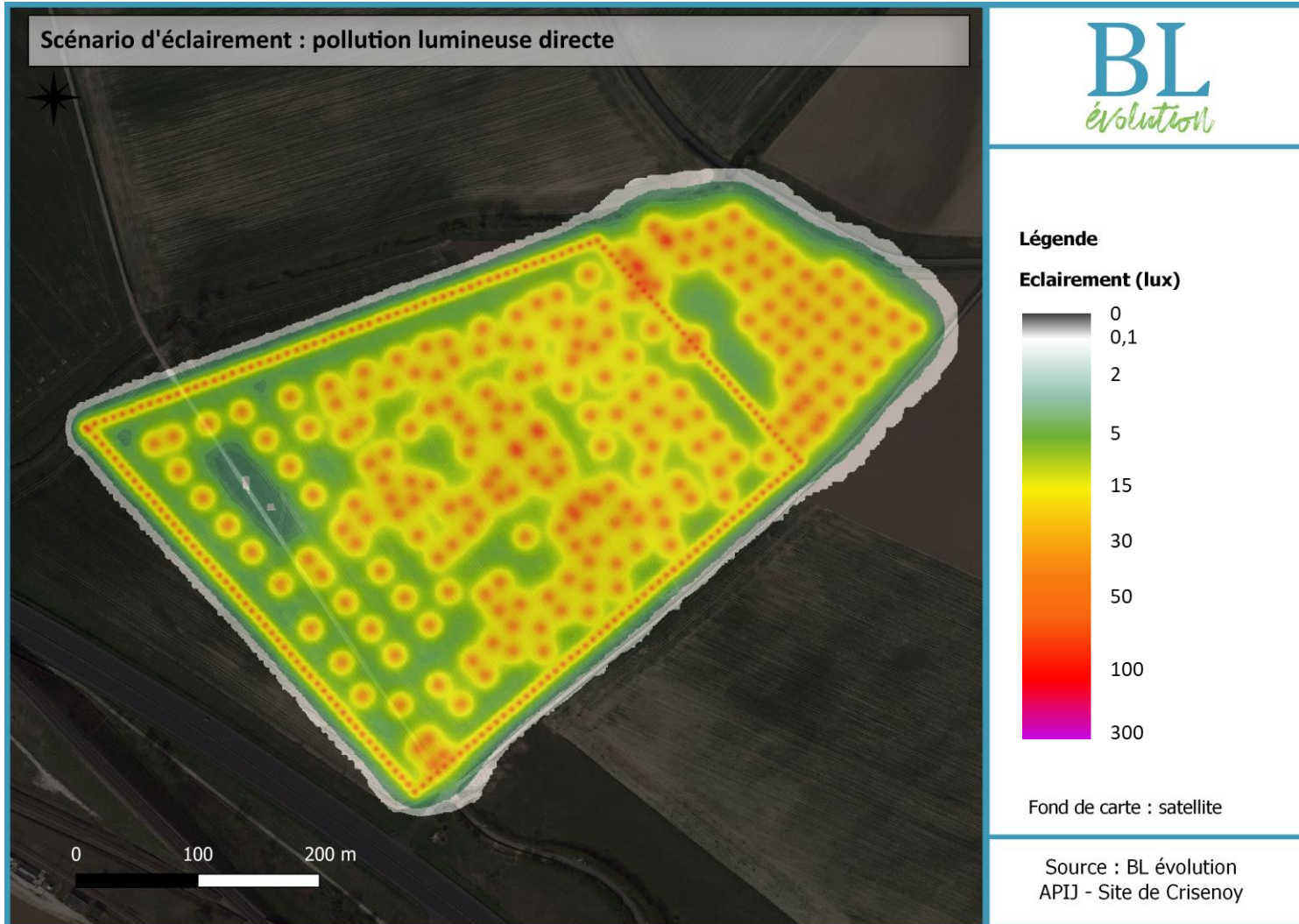
A noter que les flux lumineux peuvent être obstrués par des éléments (reliefs, arbres, haies). Cette potentielle obstruction n'est pas prise en compte dans cette étude.

Modélisation du halo lumineux :

Pour la modélisation du halo lumineux du projet et de son influence sur l'environnement nocturne, il a été considéré aucun ULOR conformément à l'arrêté. Néanmoins, la réflexion du sol a été prise en compte.

Ainsi les types de sols sont entrés dans le modèle pour simuler le halo lumineux. Cette simulation prend aussi compte de l'obscurité initiale.

Modélisation prédictive de l'éclairage



La simulation montre un éclairage particulièrement concentré au niveau de l'enceinte principale et de la zone potentiellement bâtie hors-enceinte. Une seconde strate d'éclairage est visible au niveau du mur d'enceinte extérieur.

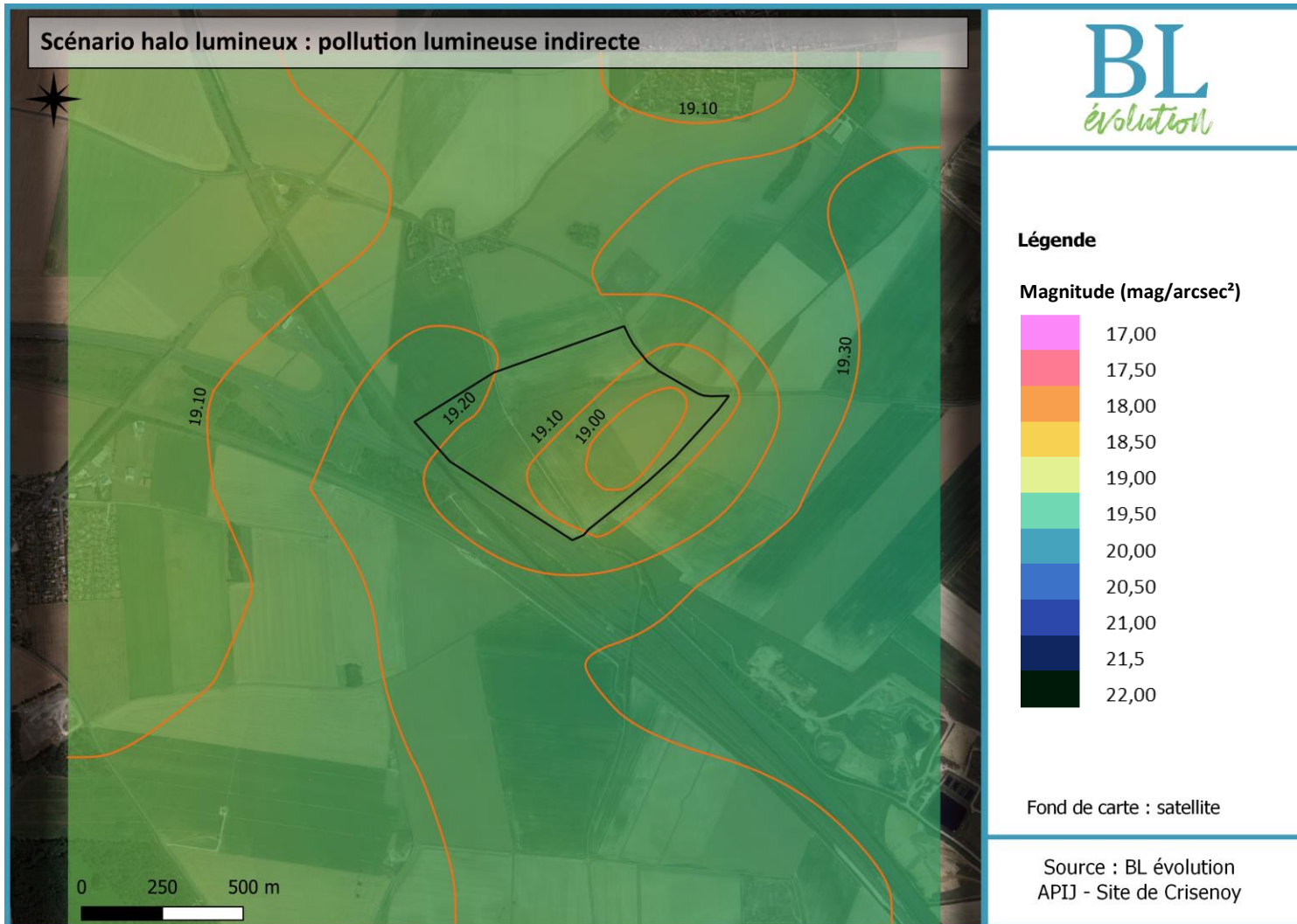
À l'intérieur de l'enceinte, l'éclairage peut atteindre jusqu'à 75 lux. Sur les zones périphériques, l'éclairage atteint jusqu'à 35 lux.

Au-delà, la quantité de flux lumineux régresse en fonction de la distance des points lumineux imaginés.

La surface réceptrice d'un éclairage peut s'étendre jusqu'à 75 mètres au delà de la limite extérieure du chemin de ronde/glacis.

À partir de cette modélisation de l'éclairage, nous avons procédé au calcul permettant de convertir les données d'éclairage en luminance (candela/m^2) pour estimer, de manière théorique, l'influence du futur projet sur l'obscurité du périmètre d'étude. La magnitude est ensuite transformée en mag/arcsec^2 et moyennée avec les conditions initiale pour estimer la qualité de l'obscurité du ciel, après la mise en place du projet.

Modélisation prédictive du halo lumineux



Les résultats de la simulation du halo lumineux potentielle montrent une implication relative dans la qualité de l'obscurité du ciel déjà altérée de la zone d'étude. En effet, la transformation des données d'éclairage en magnitude montrent 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 atteinte 18,95 mag/arcsec² par rapport à 19,40 mesuré 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 autour du projet qui régresse avec la distance.

Globalement, l'influence du nouveau projet va amener une magnitude de 19,20 mesurée initialement au nord-ouest à s'étendre en direction du sud-est, et altérant de manière modérée la qualité de l'obscurité du ciel à proximité du site.

A noter que la simulation implique que les éclairages respectent l'arrêté, ainsi les sources disposent d'un ULOR=0 (donc aucune lumière directe en direction du ciel).

Pollution lumineuse directe simulée:

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

- Le projet étant particulièrement peu avancé à ce stade, la modélisation de l'éclairage et des effets sur le halo lumineux et la qualité de l'obscurité du ciel restent aujourd'hui partiels et théoriques. L'emplacement exact des bâtiments, des possibles annexes (parkings) et par conséquent des points lumineux ne sont pas connus. Ainsi la modélisation implique plusieurs hypothèses pour simuler les résultats.
- La simulation théorique de l'éclairage montre que le niveau le plus élevé est à attendre principalement à l'intérieur des périmètres. Ceci implique que ces espaces sont déjà sous contraintes d'artificialisation des sols.
- La simulation implique aussi la présence d'éclairage sur les parties extérieures des périmètres des enceintes. Ainsi les possibles éclairages situés en bordures extérieures peuvent avoir une influence jusqu'à 95 mètres au-delà du périmètre.

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 des agglomérations alentours, et notamment le halo global de la région parisienne, renforcé au sud par la présence de l'agglomération de Melun.
- Les résultats de la modélisation font apparaître une altération de l'obscurité du ciel par rapport à l'état initial. Cette altération sera la plus importante au niveau du projet. La diffusion du halo lumineux, qui est simulée par un coefficient de diffusion théorique, montre aussi une dégradation de l'obscurité au-delà des limites du projet.
- Le projet va donc contribuer relativement à prolonger le niveau de qualité de l'obscurité du ciel mesurée au nord-ouest en direction du sud-ouest.
- La simulation implique qu'aucune source d'éclairage ne soit orientée en direction du ciel, limitant ainsi une trop forte dégradation .
- De manière générale, le projet va impliquer une modification plus importante de la qualité de l'obscurité du ciel au niveau des espaces bâtis, qui sont déjà soumis à d'autres contraintes issues de la construction (artificialisation des sols...). Autour du projet la modification de la qualité de l'obscurité du ciel reste relative, notamment car il s'inscrit dans un ciel déjà touché par un halo lumineux important. **Les principaux enjeux du projet s'orientent plutôt sur la pollution lumineuse directe.**

Les effets probables de l'impact des projets sur l'environnement nocturne

Etude des impacts du projet

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

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

La flore :

Les effets de la pollution lumineuse sont un élément relativement peu renseignés. 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.).

L'étude faune/flore n'est pas disponible, mais le projet s'inscrit dans un milieu peu propice (espace agricole céréalier). Les seules zones avec la présence d'une végétation potentiellement intéressante correspondent à la ripisylve au niveau du ru d'Andy.

▪ Incidences notables du projet :

L'éclairage du projet pourra venir mettre en lumière certaines espèces floristiques.

▪ **Impact classé faible (pollution lumineuse directe)**

Les invertébrés :

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 enjeux :

- La zone d'étude abrite des habitats peu favorables, peu de données écologiques révèlent la présence d'insectes protégés. Seul un papillon de jour a été identifié à ce stade.

Incidences notables du projet :

Les habitats proches restent peu propices aux insectes nocturnes. Les zones humides peuvent néanmoins être des habitats pertinents pour la présence d'insectes nocturnes. Le ru d'Andy et sa ripisylve présentent les principaux enjeux

De plus, les effets de la pollution lumineuse directe peuvent être élargis à des zones éloignées du périmètre d'étude. Notamment car les insectes peuvent être attirés à des distances importantes (plusieurs centaines de mètres) et que la lumière est un enjeu très fort, même au-delà des espaces avec de l'éclairage.

- **Impact modéré (pollution lumineuse directe)**

Les amphibiens

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

- Baisse de la reproduction
 - 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.
- Altération des déplacements
 - 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.

Les enjeux :

Aucune espèce d'amphibien n'est présente.

Incidences notables des projets :

Aucun amphibien n'est présent au sein du ru. Les autres zones humides identifiées restent éloignées pour être impactées.

- **Impact nul**

Reptiles

- Outre les tortues marines, 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 sous les lampadaires les espèces qui sont attirées. Ce qui peut entraîner une perturbation globale des chaînes trophiques, induisant une prolifération des prédateurs et une baisse du nombre des proies.

Les enjeux du projet :

Une espèce est présente, le lézard des murailles, qui est protégée. Aucune études ne permet d'identifier l'impact de la pollution lumineuse sur cette espèce. Cette espèce est néanmoins une espèce diurne et à sang chaud qui est active plutôt en cœur de journée (présence du soleil). Les enjeux restent très faibles.

Incidences notables du projet :

Ce sont les éclairages directs qui pourraient être plus impactant pour les reptiles. Néanmoins, l'espèce recensée sur la commune présente à priori peu d'enjeu par rapport à la pollution lumineuse, ou du moins ceux-ci n'ont pas fait l'objet d'étude connue.

- **Impact non-caractérisable.**

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 :

- 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
- 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

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).

Les enjeux du projet :

De nombreuses espèces ont pu être recensées sur la commune de Crisenoy. De plus, la Seine et Marne est identifiée comme un couloir de migration. La majorité des espèces patrimoniales identifiées sont plutôt diurnes mais la lumière peut perturber la nidification. L'Alouette des champs est une espèce qui migre la nuit.

Plus difficile à caractériser, mais d'autres espèces, non-recensées, peuvent potentiellement suivre le couloir migratoire global qu'est la Seine-et-Marne.

Incidences notables du projet :

Que ce soit les éclairages directs ou le halo lumineux créé, les espèces présentes peuvent être sensibles à la pollution lumineuse directe, notamment sur la nidification mais aussi par la pollution lumineuse indirecte du projet pour la migration.

- **Impact fort (pollution lumineuse directe et indirecte)**

Mammifères

Beaucoup d'espèces de mammifères terrestres manifestent une répulsion vis-à-vis de la lumière (phototaxie positive), 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)

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/arcsec^2 (donc une obscurité relativement importante) pour que les individus s'épanouissent dans les meilleures conditions. 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 :

- Effets directs sur les colonies de reproduction, gîtes d'hibernation et les reposoirs
 - Potentielle destruction de colonies et modification de la physionomie des juvéniles (plus petits lorsqu'ils occupent des bâtiments éclairés et retard de croissance)

- Effet de barrière visuelle
 - Fragmentation des paysages nocturnes
- 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)

Concernant les mammifères terrestres

Enjeux sur le projet :

Les espèces de mammifères terrestres contactées sur le site sont communes. L'intérêt écologique concernant ce groupe est faible. Le hérisson est l'espèce qui a une réponse la plus négative à la pollution lumineuse, notamment les éclairages directs.

Incidences notables du projet :

La pollution lumineuse directe pourra réduire la zone de vie des espèces de mammifères, notamment la présence du hérisson, tant dans son espace de vie que dans ses déplacements. Néanmoins peu d'habitat semblent favorables au hérisson. La ripisylve du ru peut potentielle lui être favorable.

- **Impact faible (pollution lumineuse directe)**

Concernant les chiroptères

Enjeux sur le projet :

Deux espèces, sont présentes : la pipistrelle commune et la pipistrelle de Khule. Ces espèces peuvent être moins sensibles à la présence de lumière. Néanmoins, la pollution lumineuse peut tout de même altérer leur comportement et la relation avec leurs proies.

Le ru d'Andy pourrait apparaître comme un corridor potentiel de transit.

Incidences notables du projet :

La pollution lumineuse directe pourra modifier les relations proies/prédateurs, principalement pour la pipistrelle. L'autre enjeu se situe au niveau du ru d'Andy, représentant un corridor potentiel, qui pourra subir la pollution lumineuse et ainsi réduire sa capacité pour le transit des chiroptères.

- **Impact fort (pollution lumineuse directe)**

Poissons et organismes aquatiques

Outre les effets sur les espèces marines, l'activité piscicole reste peu étudiée sous l'angle de la pollution lumineuse. Les zooplanctons par exemple peuvent être fortement perturbée par la présence d'éclairage directe. Certains poissons marins ont fait aussi l'objet d'étude démontrant des perturbations. Dans ce sens, les poissons d'eau douce pourraient être aussi potentiellement touchés.

Les effets de la pollution lumineuse ont pour conséquence :

- Reproduction
 - La lumière artificielle peut altérer l'éclosion des poissons marins et perturber la période de reproduction, comme la smoltification des saumons.
- Attraction
 - Les alevins se dispersent essentiellement la nuit. La présence de lumière artificielle pourrait modifier et altérer le comportement de dissipation des espèces (les saumons et les truites ont été testés).
- Migration :
 - La présence de lumière directe pourrait limiter la migration des poissons, réduisant leurs déplacements et pouvant potentiellement agir comme une barrière physique. Des études sont en cours sur ce sujet.

Enjeux sur le projet :

La question des poissons et des organismes aquatiques n'a pas fait l'objet d'étude à l'état initial. Seul un ru à très faible débit est présent. Celui-ci représente potentiellement peu d'enjeux.

Incidences notables du projet :

La pollution lumineuse directe pourra limiter une potentielle migration et une perturbation relative des organismes aquatiques. L'enjeu reste faible pour ce taxon.

- **Impact faible (pollution lumineuse directe)**

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.



Cette carte permet d'étudier les enjeux de trame noire en superposant les résultats de la pollution lumineuse directe avec la trame verte et bleue issue du Schéma Régional de Cohérence Ecologique (SRCE IdF).

Les résultats montrent qu'un enjeu apparaît au niveau du ru. En effet, le ru d'Andy pourra potentiellement être récepteur d'un éclairage. Cela provient du scénario qui implique des éclairages répartis sur l'ensemble de l'annexe.

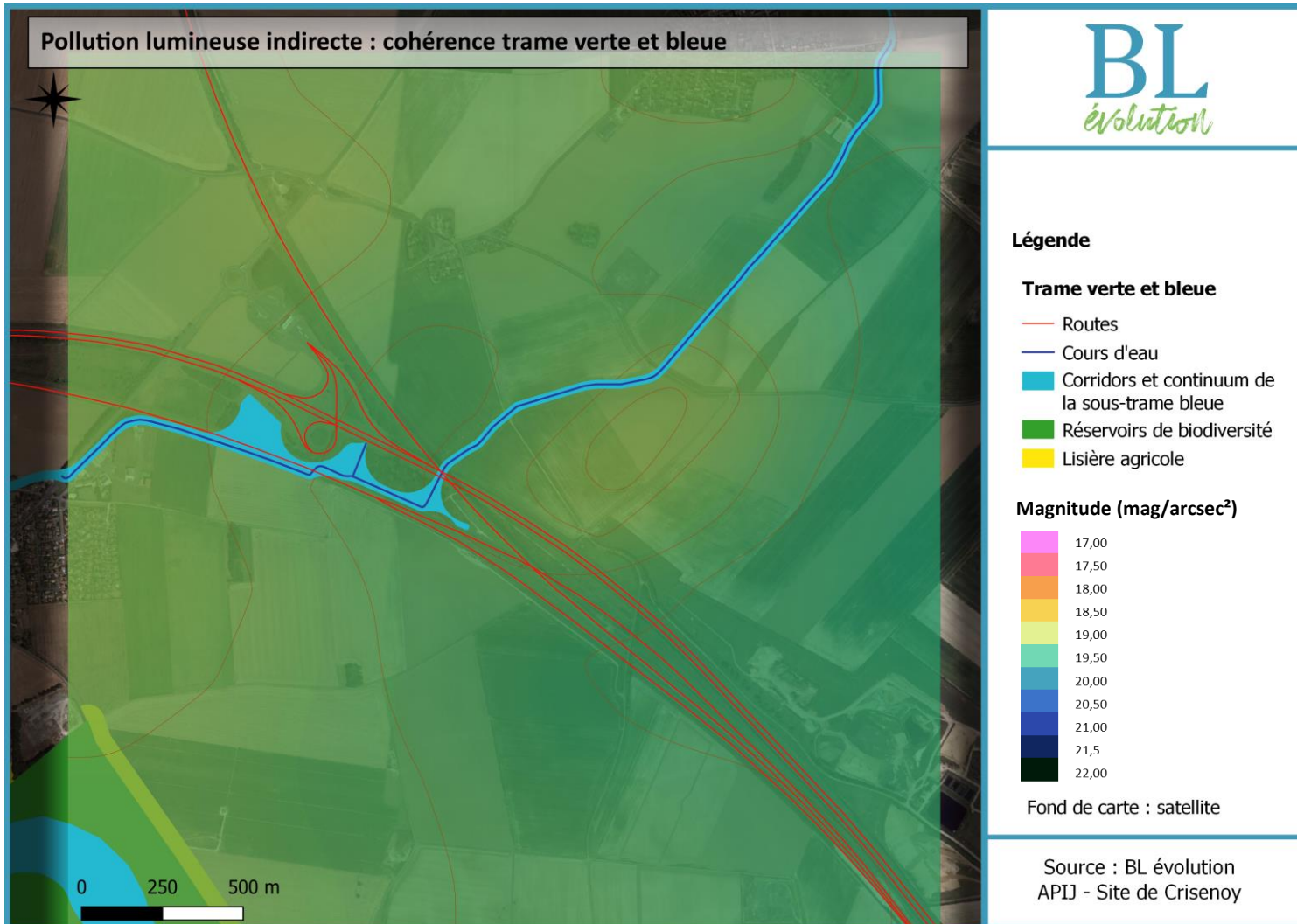
Cet éclairage pourra atteindre 15 lux sur la partie nord. Un éclairage qui pourra perturber la migration des espèces en lien avec la sous-trame bleue. Comme vu précédemment, cela peut aussi potentiellement concerner les chiroptères.

Cette configuration et l'éclairage sur la zone nord aura un impact important.

Les autres composantes de la trame verte et bleue ne présentent aucun enjeu.

- **Impact fort**

Etude d'impact sur la cohérence écologique : pollution lumineuse indirecte



L'étude a aussi été menée sur la modification théorique de la qualité de l'obscurité du ciel au niveau du futur projet.

L'obscurité au niveau du ru est de nouveau le principal enjeu. Néanmoins, les modifications de qualité de l'obscurité du ciel restent un impact nettement moins important que la pollution lumineuse directe.

On notera que le réservoir de biodiversité situé à l'extrême sud ne devrait pas connaître de modifications des conditions initiales.

▪ **Impact faible**

Concernant le volet humain, la pollution lumineuse est la source d'un impact certain sur la santé. De nombreuses études montrent une perturbation de l'horloge biologique qui altère notamment la régulation hormonale. La production de la mélatonine (hormone du sommeil) est perturbée en présence de lumière directe. Plusieurs pistes scientifiques mettent en avant d'autres différents facteurs liés à ces perturbations hormonales qui peuvent jouer un rôle sur la santé et le bien-être, comme des liens avec le stress et l'anxiété, l'obésité voire le cancer.

Toutes les avancées scientifiques sur le sujet de la santé humaine en lien avec la pollution lumineuse ne font pas consensus, comme par exemple, les effets des éclairages directs sur l'œil et le vieillissement prématuré des yeux humains.

Cependant, elles s'accordent toutes sur le fait que la pollution lumineuse et notamment l'éclairage direct dans des tons bleus ont des effets sur la santé.

L'état initial avait permis de mettre en avant qu'aucune habitations n'étaient présentes sur le périmètre d'étude et que certaines sont présentes à 500 mètres du projet.



Concernant la pollution lumineuse directe, la simulation de l'éclairage a démontré que les flux lumineux sont particulièrement concentrés au sein des périmètres d'enceinte.

Néanmoins, la diffusion des éclairages les plus extérieurs peuvent avoir une influence au-delà de la limite propre des projets. Cependant, cette diffusion théorique simulée reste limitée à une centaine de mètres.

Pour rappel, les bâtiments au sud du projet ne sont pas résidentiels.

Du point de vue de la pollution lumineuse directe, le projet ne devrait pas représenter un enjeu pour la quiétude et la santé des habitants.

- Impact nul



En ce qui concerne la pollution lumineuse indirecte, le constat est similaire. Le projet va entraîner une modification de la qualité de l'obscurité du ciel qui ne se limite pas au périmètre strict du projet.

Néanmoins, les habitations les plus proches restent relativement éloignées.

La qualité du ciel au zénith du hameau des Bordes devrait être sensiblement identique.

- Impact nul

Concernant le personnel et les détenus, la présence de lumière est obligatoire pour assurer le travail des agents. Un bon éclairage est nécessaire pour limiter la fatigue visuelle et assurer de bonnes conditions de travail en période nocturne. Un bon éclairage permet d'assurer la bonne surveillance et les déplacements. A l'heure actuelle, les types de sources ne sont pas encore définis et l'étude est établie sur les exigences réglementaires devant permettre la bonne réalisation du travail. Ainsi le projet ne dispose pas d'impact négatif pour le personnel.

Comme pour les habitations, en ce qui concerne les détenus, la lumière parasite dans les chambres peut jouer un rôle sur l'horloge biologique et la sécrétion d'hormones et le bien-être. Cependant, l'éclairage des façades est une exigence réglementaire au sein des établissements pénitentiaires. Les caractéristiques techniques des éclairages n'étant pas encore définies, le projet n'inclut pas d'impacts négatifs pour les détenus.

Dans le sens où les caractéristiques techniques de l'éclairage ne sont pas encore définies à cette étape de l'étude, l'impact ne peut pas être caractérisé. Cependant, les préconisations et les recommandations tiendront compte de la santé du personnel et des détenus en incluant les bonnes conditions de travail.

- **Impact non caractérisable**

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.

Cependant, certains impacts peuvent encore être méconnus et/ou manquer de solidité. Dans ce cas, ils ne seront pas cités dans l'étude d'impact (exemple des impacts sur les reptiles).

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 :

Positif	Nul	Faible	Modéré	Fort	Très fort
Impact qui aura un effet positif pour l'environnement nocturne	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'irréversibilités pour les écosystèmes)	Le projet aura un effet avéré majeur sur les populations et pourra mettre en danger les plus vulnérables (disparition probables d'espèces en danger)	Le projet aura un effet dangereux et irréversible sur l'ensemble de la population sur le projet

Hiérarchisation des enjeux

Taxons	Enjeux de pollution lumineuse (réponse des espèces)	Enjeux retenus dans l'étude faune flore	Impact du projet
Flore	Faible	Faible	Faible <i>Pollution lumineuse directe au niveau de la ripisylve du ru d'Andy</i>
Invertébrés	Fort (invertébrés nocturnes)	Faible	Modéré <i>Pollution lumineuse directe au niveau de la ripisylve du ru d'Andy. Attraction potentielle sur de grandes distances</i>
Amphibiens	Modéré	Faible	Nul
Reptiles	Mal connu	Faible	Non caractérisable
Oiseaux	Fort	Très Fort (nidification) Faible (migration) Modéré (hivernage)	Fort <i>Pollution lumineuse directe sur de potentielles zones de niche Pollution lumineuse indirecte globale qui va concerner la migration</i>
Chiroptères	Fort	Modéré	Fort <i>Pollution lumineuse directe au niveau du ru d'Andy, identifié comme corridor potentiel Présence de la pipistrelle, mais qui reste un enjeu moins important</i>
Mammifères	Faible	Faible	Faible <i>Pollution lumineuse directe pour le hérisson au niveau des habitats les plus favorables (potentiellement ru d'Andy)</i>
Poisson et organismes aquatiques	Modéré	Non étudié	Faible <i>Pollution lumineuse directe du ru d'Andy</i>
Cohérence des écosystèmes	Fort	Faible	Fort <i>Pollution lumineuse directe du ru d'Andy</i>

Conclusion des impacts des projets

Globalement les impacts du projet sont modérés, mais un enjeu majeur est présent au niveau du ru d'Andy. En effet, déjà à l'état initial, cet espace est identifié comme la principale source d'enjeux.

Celui-ci pourra être directement touché par des éclairages issus des éclairages les plus à l'ouest du projet. Selon la simulation, l'éclairage reste faible (inférieur à 1 lux). Néanmoins, certaines espèces peuvent être sensibles à des niveaux d'éclairage faibles.

Cela représente un enjeu essentiellement pour les chiroptères, pour les autres potentielles espèces associées aux milieux humides (poissons, organismes aquatiques, amphibiens) mais aucune espèce n'a été mise en évidence dans les inventaires.

La cohérence des écosystèmes semble peu propice sur le territoire d'étude, notamment par la présence des infrastructures routières. Seul le ru est un élément identifié par le SRCE.

L'autre enjeu important concerne l'avifaune. Le projet pourra d'une part altérer la nidification avec les flux lumineux qui impliquent potentiellement des éclairages qui vont au-delà de l'enceinte du projet. Les habitats semblent assez peu favorables, à l'exception de la ripisylve du ru. Cependant, la question de la migration est aussi un enjeu et le halo lumineux est déjà peu propice à l'état initial. Le projet pourra participer à altérer cette qualité.

Concernant les habitants, les enjeux restent particulièrement faibles du point de vue de la pollution lumineuse directe et indirecte.

Le plus important est donc de travailler sur les éclairages les plus à l'ouest pour éviter et réduire les impacts du projet sur le ru d'Andy.

Les mesures correctrices

Limiter et réduire l'impact

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) et renforçant l'intensité du halo lumineux
- Viser une sobriété lumineuse en répondant de manière précise aux besoins et se restreindre au nécessaire
- Utiliser des éclairages performants peu consommateurs pour limiter le gaspillage d'énergie
- Réaliser des extinctions ou des abaissements de puissance là où c'est possible en tenant compte des exigences (sur les parkings par exemple).

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. **Ce qui permettra de limiter l'éclairage du ru.**
- 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. **Cela sera particulièrement bénéfique pour les oiseaux.**

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

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

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

Comme vu dans l'étude des impacts du projet, le point majeur pour le Crisenoy se concentre sur le ru d'Andy. Pour éviter et réduire au maximum les enjeux, il sera nécessaire de limiter l'éclairage de la zone comme ce qu'à pu démontrer la simulation avec des sources lambertienne (qui diffuse une luminance égale dans toute les direction).

Pour cela des préconisations techniques sont nécessaires :

- **Ne pas éclairer les abords du parkings côté ru** : pour limiter les incidences importantes sur le ru d'Andy, **il est interdit (arrêté sur les nuisances lumineuse datant du 27 décembre 2018) d'éclairer les espaces aquatiques. La mise en place d'éclairage au nord-ouest du parking, dirigé vers le ru d'Andy, est donc à proscrire.**
- **Moduler l'intensité des éclairage du parking et les bâtiments hors-enceinte** : cela permettra de réduire d'importants impacts sur le ru d'Andy.
- **Orienter les flux vers l'intérieur du projet** : il est nécessaire que les éclairages les plus à l'ouest aient un flux qui soit strictement orienté vers l'est. Cela diminuera fortement le risque d'un éclairage même minime du ru et de sa ripisylve.
- **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. Une renforcement de ce principe (LED inférieures à 2700K) sur la partie ouest sera bénéfique.

- **Mettre en place des solutions passives pour couper les flux** : pour limiter la possibilité d'éclairage, des haies peuvent être mise en place entre le projet et le ru et sa ripisylve pour couper les flux lumineux et créer de l'obscurité.
- **Limiter l'éclairage au strict nécessaire pour ne pas impliquer un sur-éclairage** : limiter le nombre de lampadaires surtout sur la zone ouest.

Mesures prises en compte pour réduire les enjeux au niveau du ru d'Andy :

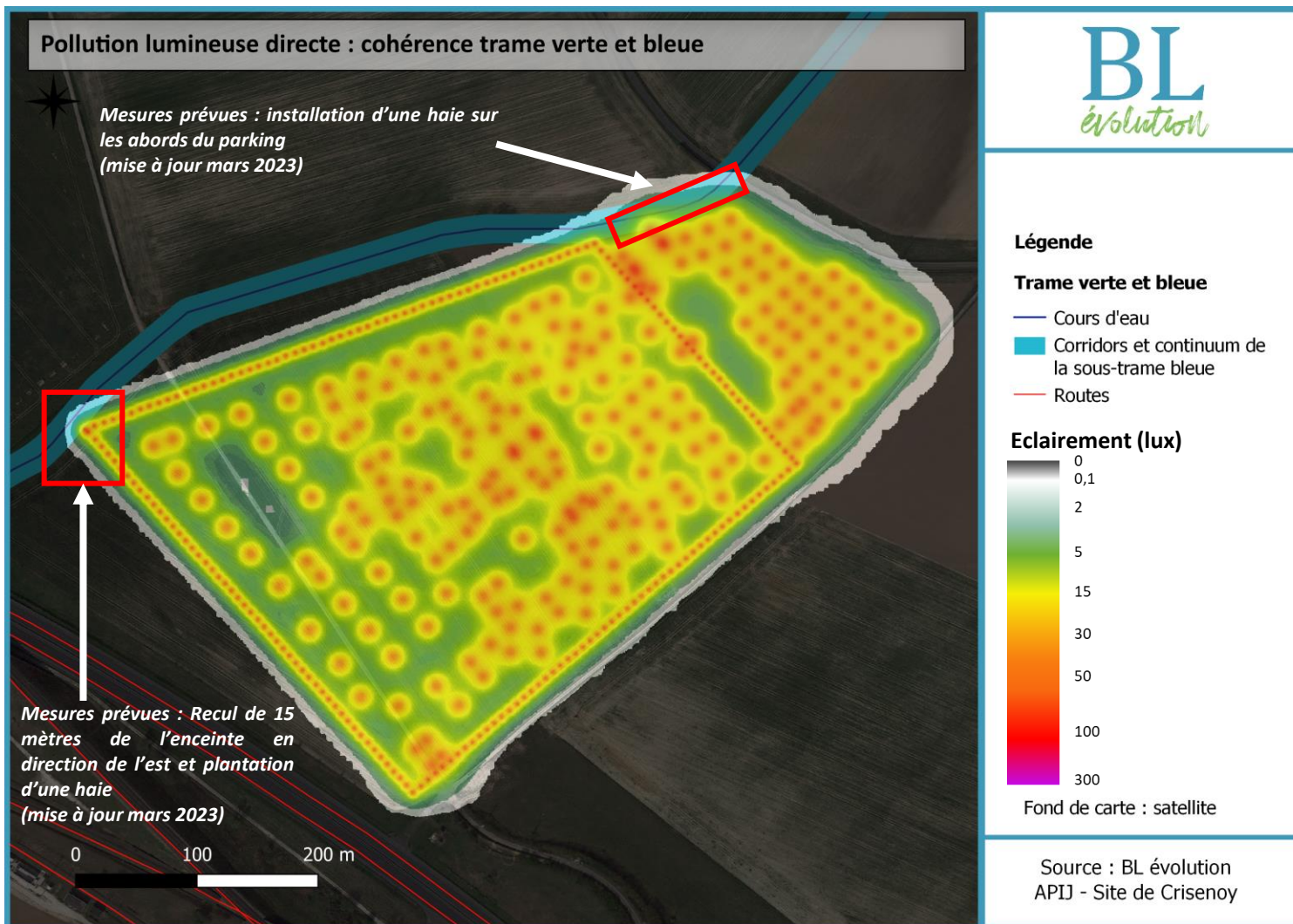
Sur la partie sud-ouest du périmètre :

- **Le recul du périmètre au niveau de l'angle ouest** : l'éclairage de l'enceinte impliquait un potentiel éclairage marqué directement au sein du ru d'Andy. La prise en compte de cet espace a permis de mettre à distance le mur d'enceinte du ru d'Andy.
- **La mise en place de haie renforcée** : initialement cette zone à nu en terme de haie, l'ensemble du ru va faire l'objet d'une plantation d'espèces végétales pour renforcer les aspects paysagers et écologiques. Avec un renforcement à ce niveau du ru d'Andy, la mise en place de ces éléments arborés va permettre de réduire les enjeux d'éclairage du ru en obstruant directement les flux lumineux

Sur la partie nord-est du périmètre :

- **Implantation de haie sur les abords du parking** : les éclairages du parking imaginés ici pourraient éclairer la ripisylve et le ru. La mise en place d'une haie directement au niveau du parking permettra d'obstruer les flux et d'ainsi limiter les enjeux de pollution lumineuse directe.

Mesures correctrices : pollution lumineuse directe



Mesures de réduction et d'évitement déployées pour réduire les enjeux de pollution lumineuse.

Synthèse des mesures pour limiter et réduire l'impact

Groupes étudiés	Mesure d'évitement	Mesures de réduction
FLORE	<ul style="list-style-type: none"> • Limiter l'éclairement direct à l'intérieur de l'enceinte • Limiter la densité de lumen par surface • Utiliser des températures de couleurs inférieures ou égale à 2700K 	
INVERTÉBRÉS	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser un verre de protection Lampadaire avec un indice de protection (IP) supérieur à 65. • Limiter l'éclairement direct à l'intérieur de l'enceinte • Limiter la densité de lumen par surface 	<ul style="list-style-type: none"> • Limiter l'éclairement direct à l'intérieur du projet • Utiliser des températures de couleurs inférieures ou égales à 2700K • Créer des zones d'obscurité autour du projet (haie) et recul du périmètre
AMPHIBIENS	<ul style="list-style-type: none"> • Limiter l'éclairement direct à l'intérieur de l'enceinte • Limiter la hauteur des éclairage inférieur ou égale à 4 mètres • Interdiction de la mise en lumière du ru d'Andy 	<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) et recul du périmètre
REPTILES	<ul style="list-style-type: none"> • Éclairer en direction du sol (ULOR=0) • Limiter l'éclairement 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'éclairement direct à l'intérieur de l'enceinte • Limiter la densité de lumen par surface • Limiter la hauteur des éclairages inférieure ou égale à 4 mètres 	<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'éclairement direct à l'intérieur de l'enceinte • Limiter la densité de lumen par surface • Modulation d'intensité sur le parking et les bâtiments hors-enceinte à 22h. • Interdiction de la mise en lumière du ru d'Andy 	<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) • Créer des zones d'obscurité autour du projet (haie) en priorité au niveau du ru d'Andy et recul du périmètre • Moduler les puissances de l'éclairage en cours de nuit
MAMMIFÈRES	<ul style="list-style-type: none"> • Éclairer en direction du sol • Limiter l'éclairement direct à l'intérieur de l'enceinte • Limiter la densité de lumen par surface 	<ul style="list-style-type: none"> • Créer des zones d'obscurité autour du projet (haie) et recul du périmètre
POISSONS ET ORGANISMES AQUATIQUES	<ul style="list-style-type: none"> • Éclairer en direction du sol • Limiter l'éclairement direct à l'intérieur de l'enceinte • Limiter la hauteur des éclairage inférieur ou égale à 4 mètres • Modulation d'intensité sur le parking et les bâtiments hors-enceinte à 22h. • Interdiction de la mise en lumière du RU d'Andy 	<ul style="list-style-type: none"> • Créer des zones d'obscurité autour du projet (haie) en priorité au niveau du ru d'Andy et recul du périmètre • Moduler les puissances de l'éclairage en cours de nuit
COHÉRENCE DES ÉCOSYSTÈMES	<ul style="list-style-type: none"> • Éclairer en direction du sol • Limiter l'éclairement direct à l'intérieur de l'enceinte. • Limiter la hauteur des éclairages inférieure ou égale à 4 mètres • Modulation d'intensité sur le parking et les bâtiments hors-enceinte à 22h. • Interdiction de la mise en lumière du ru d'Andy 	<ul style="list-style-type: none"> • Créer des zones d'obscurité autour du projet (haie) en priorité au niveau du ru d'Andy et recul du périmètre • Moduler les puissances de l'éclairage en cours de nuit • Utiliser des températures de couleurs inférieures ou égales à 2700K sur les zones à enjeux (parkings et clôtures sud)

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

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

A l'état initial, différents enjeux ont été mis en avant sur la biodiversité alors que les enjeux humains semblaient être faibles. C'est notamment le cas de l'avifaune (oiseaux) et des chiroptères qui montre des enjeux forts. Les enjeux de cohérences écologiques et d'habitats sont aussi importants par la présence du ru d'Andy. Pour le reste, le projet s'inscrit dans un contexte où le milieu naturel est peu riche, donnant des milieux peu favorables pour de nombreux taxons. On retiendra aussi la présence d'habitations qui restent éloignées.

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 le ru d'Andy et sa ripisylve par un éclairage compris entre 0,1 et 1 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.

Les résultats montrent que le futur projet pourra altérer légèrement la qualité de l'obscurité, mais sera plus impactant sur les conditions de pollution lumineuse directe.

En effet, la simulation théorique montre un éclairage potentiel de la ripisylve et du ru d'Andy. Ce qui va représenter un enjeu majeur pour les chiroptères, mais aussi pour les déplacements et la vie qui est liée aux habitats humides et aquatiques. Ces enjeux, plutôt faibles à l'état initial peuvent néanmoins être potentiellement importants dans des conditions d'éclairage direct.

On notera aussi que l'immixtion de lumière, au-delà de l'enceinte du projet, ainsi que la modification, même partielle, de la qualité du ciel nocturne pourra avoir un impact sur l'avifaune.

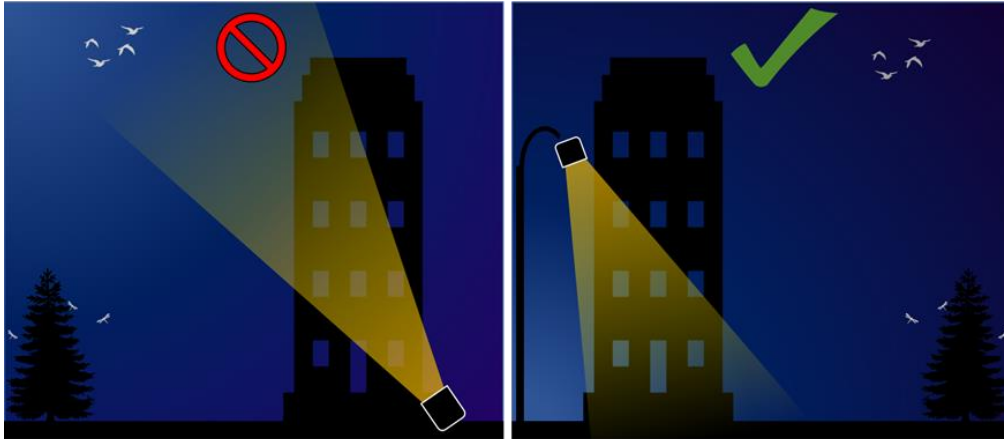
Il est donc très important de travailler sur les paramètres des éclairages pour limiter au maximum la diffusion de lumière, de limiter les lumières trop blanches, de limiter les surfaces éclairées ou encore d'éteindre lorsque la réglementation le permet.

Ensuite un travail important est à mener sur les zones ouest du projet pour éviter impérativement d'éclairer, même à très faible intensité, le ru d'Andy.

Préconisations et recommandations

Maîtriser les flux lumineux

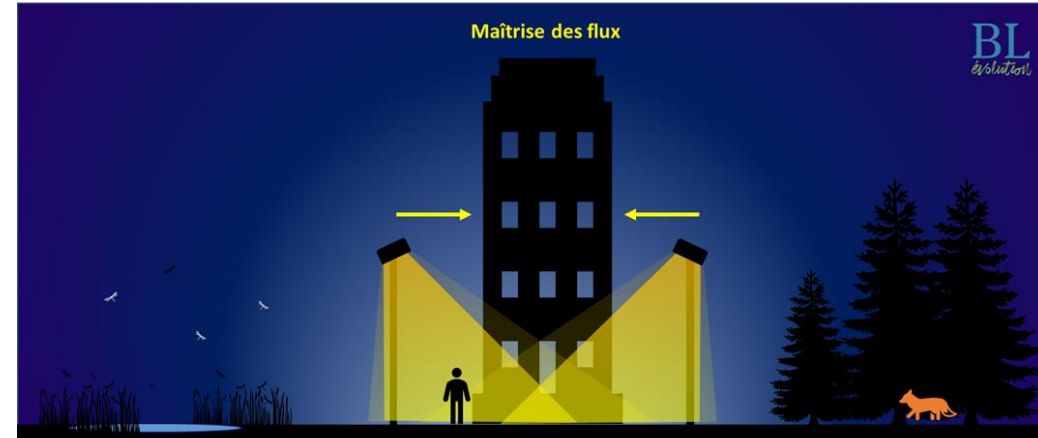
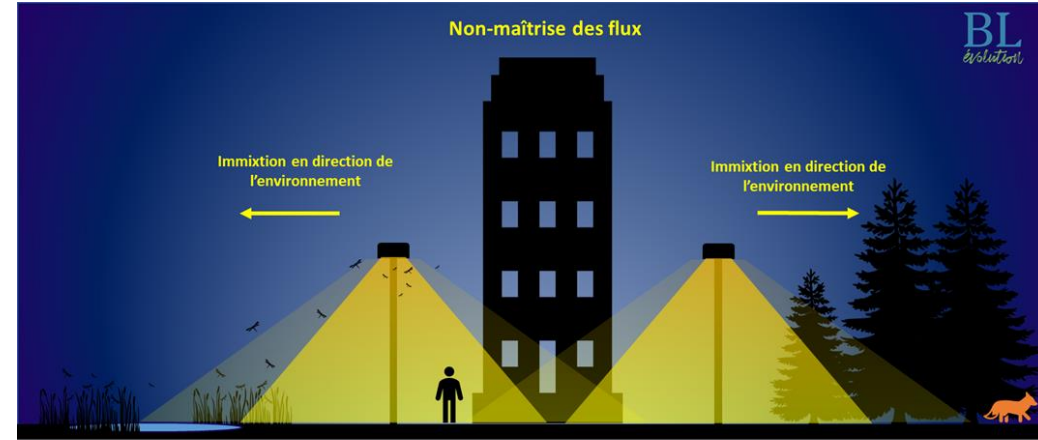
Eclairer en direction du sol



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

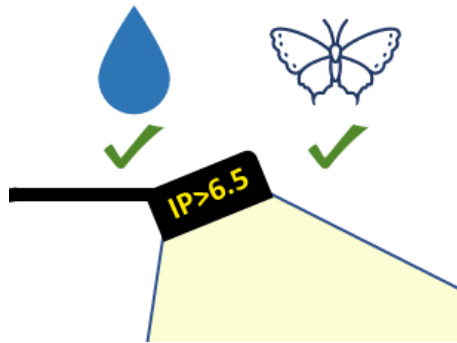


Eclairer uniquement à l'intérieur de l'enceinte

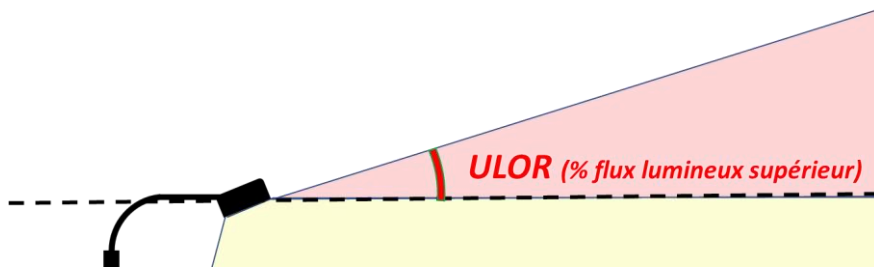


Préconisations techniques d'éclairage

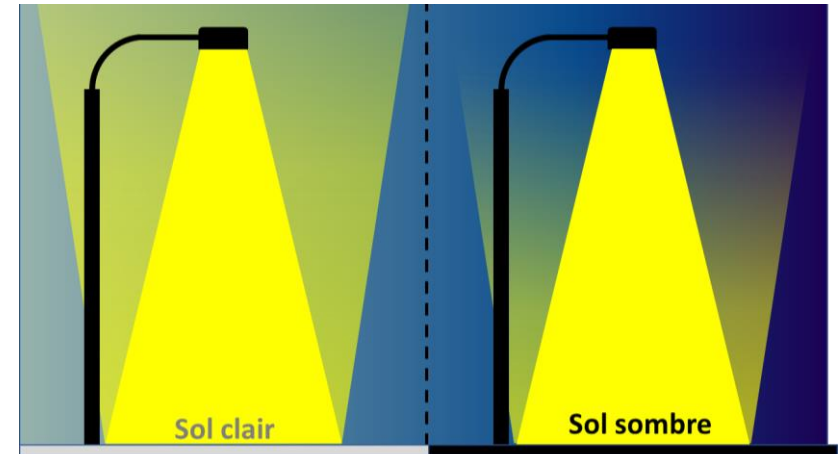
Utiliser un verre de protection lampadaire avec un indice de protection (IP) supérieur à 6.5 (résistant à l'infiltration d'eau, de poussières et donc d'insectes)



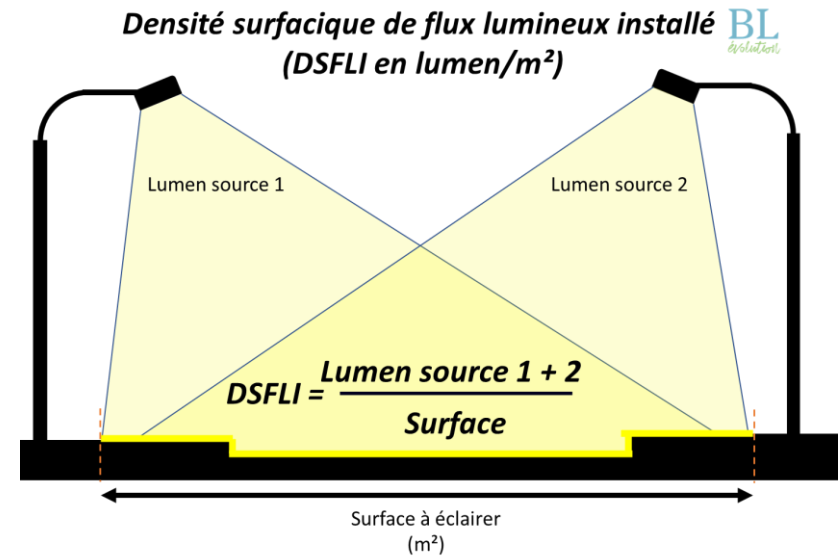
Utiliser un ULOR à 0%. Ce ratio est présent sur chaque fiche descriptive de tout lampadaire. Il exprime (en %) la fraction de flux émis vers le ciel par la source lumineuse (angle de flux total perdu par immixtion)



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

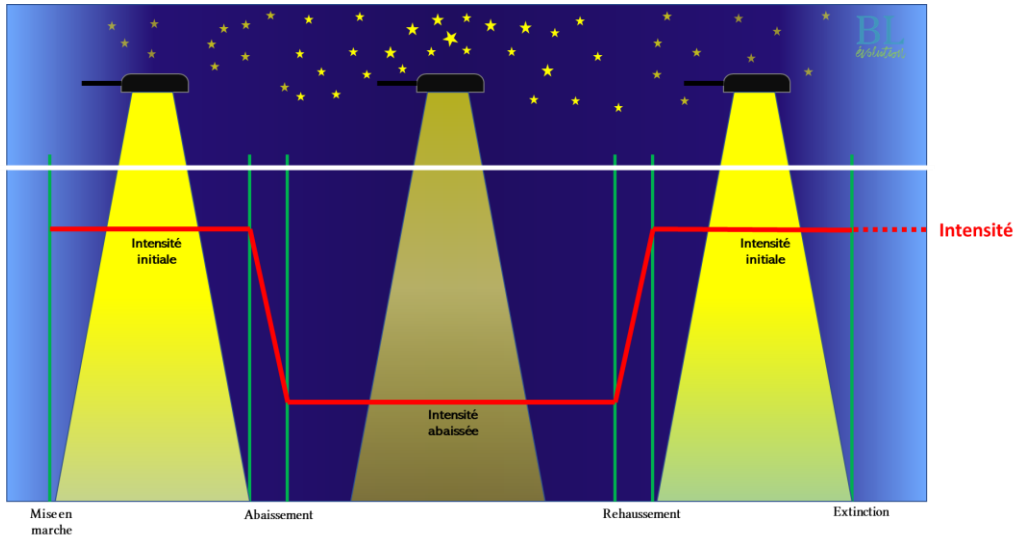


Limitier la densité surfacique de flux lumineux installé

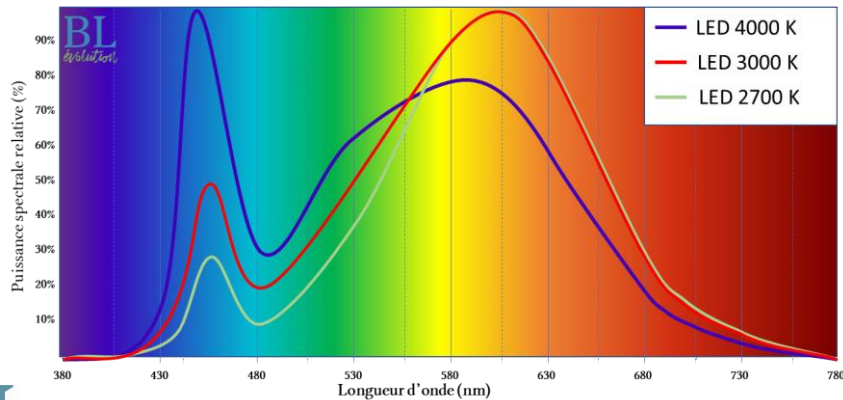


Préconisations techniques d'éclairage

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

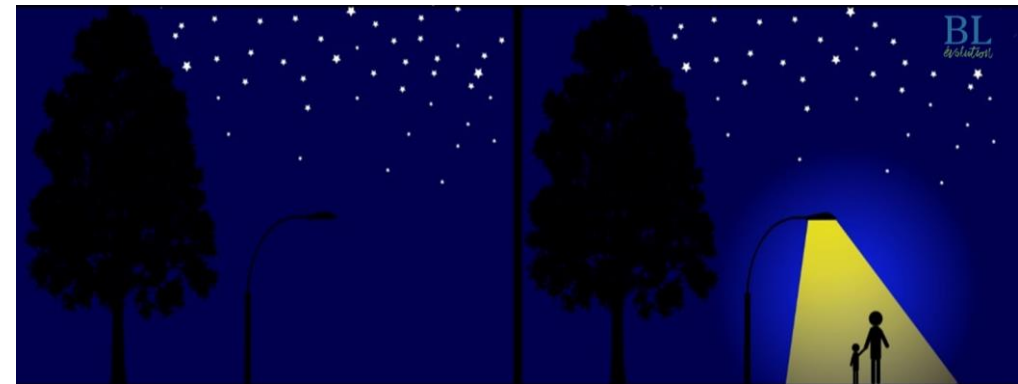


Limitier les puissances installées en portant attention aux meilleurs rendement lumineux

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



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

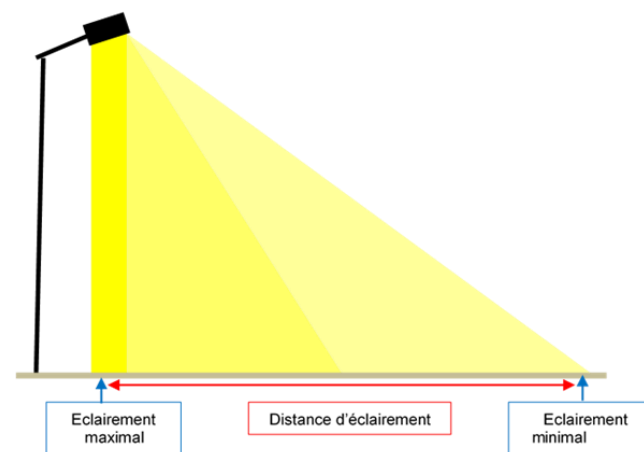
L'objectif de cette phase est de recenser l'ensemble des points lumineux au sein du périmètre et de les localiser grâce à un GPS afin de faciliter la modélisation. Seuls les éclairages du domaine public ont fait l'objet d'une analyse

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.

