



ETUDE POLLUTION LUMINEUSE

Maison d'arrêt de Vannes – site de Chapeau Rouge



Sommaire

Introduction

Page 03

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

Page 04

Page 10

Page 15

L'état initial de l'environnement nocturne

Page 19

- Analyse de données
- Analyse des enjeux à l'état initial
- Conclusion de l'état initial de l'environnement nocturne

Page 20

Page 31

Page 42

Scénario et modélisation prédictive

Page 43

- Modélisations prédictives
- Conclusions sur les simulations des projets

Page 44

Page 50

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

Page 51

- Etude des impacts des projets
- Conclusion des impacts des projets
- Les mesures correctrices

Page 52

Page 72

Page 73

Préconisations et recommandations

Page 80

Annexes

Page 85

Suivi des versions du rapport	Date
Version initiale	Mai-2022
Version mise à jour – retour APIJ	Juillet-2022
Version mise à jour – compléments étude écologique finale	Juillet-2022

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 une situation **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 visible 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.
- Le cœur de nuit : suivant le crépuscule, il 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.
- 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 sont les premiers contributeurs 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 longueurs d'ondes, plus ou moins courtes. C'est cette taille de longueurs d'ondes qui va influencer la couleur des flux. Plus elles sont courtes, plus la lumière se rapproche de l'ultra-violet, plus elles sont longues, plus le spectre sera dans l'infra-rouge.



Les causes de production de pollution lumineuse

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

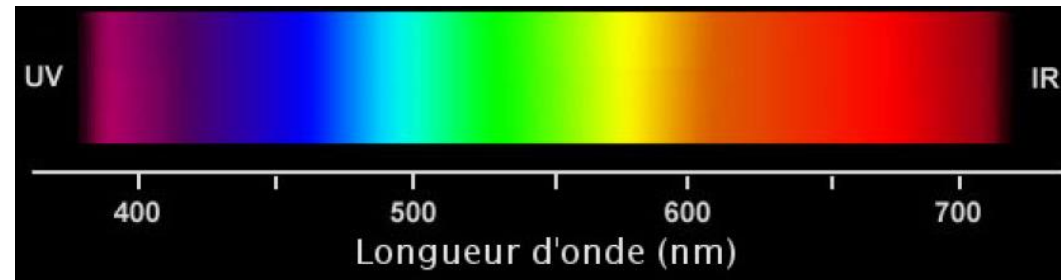
Si la majorité des taxons sont sensibles aux courtes longueurs d'ondes, il est cependant important de noter que la réponse des espèces n'est pas uniforme à cette question de couleur de flux. Certaines sont plus sensibles aux couleurs chaudes qu'aux couleurs froides. Pour cela, un tableau par taxon a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

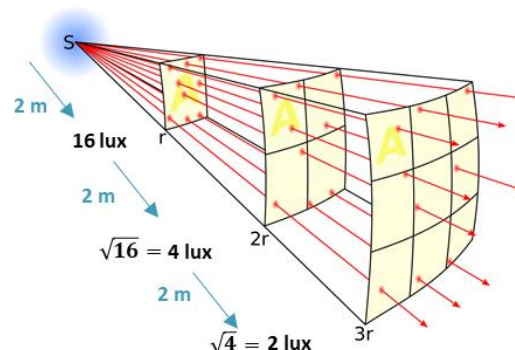
Les principales données utilisées pour comprendre la pollution directe sont le flux lumineux et l'éclairement.

- **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 m²). L'unité de l'éclairement est le **lux**. Un lux est donc :

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

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

Loi des carrés inverses :



La pollution lumineuse indirecte :

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

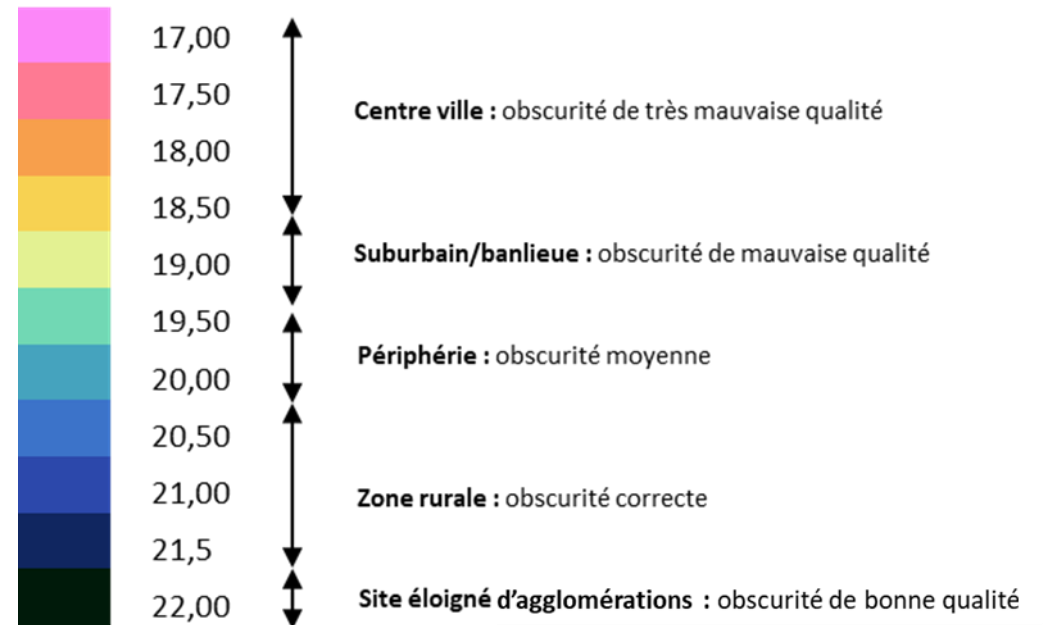
- **La radiance** : La radiance (ou luminance énergétique) est la puissance par unité de surface d'un rayonnement lumineux, dans un angle solide (en stéradian ou sr), émis en un point. Ce qu'il faut en comprendre c'est qu'il s'agit cette fois d'une mesure d'énergie et non d'une *grandeur photométrique*.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

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



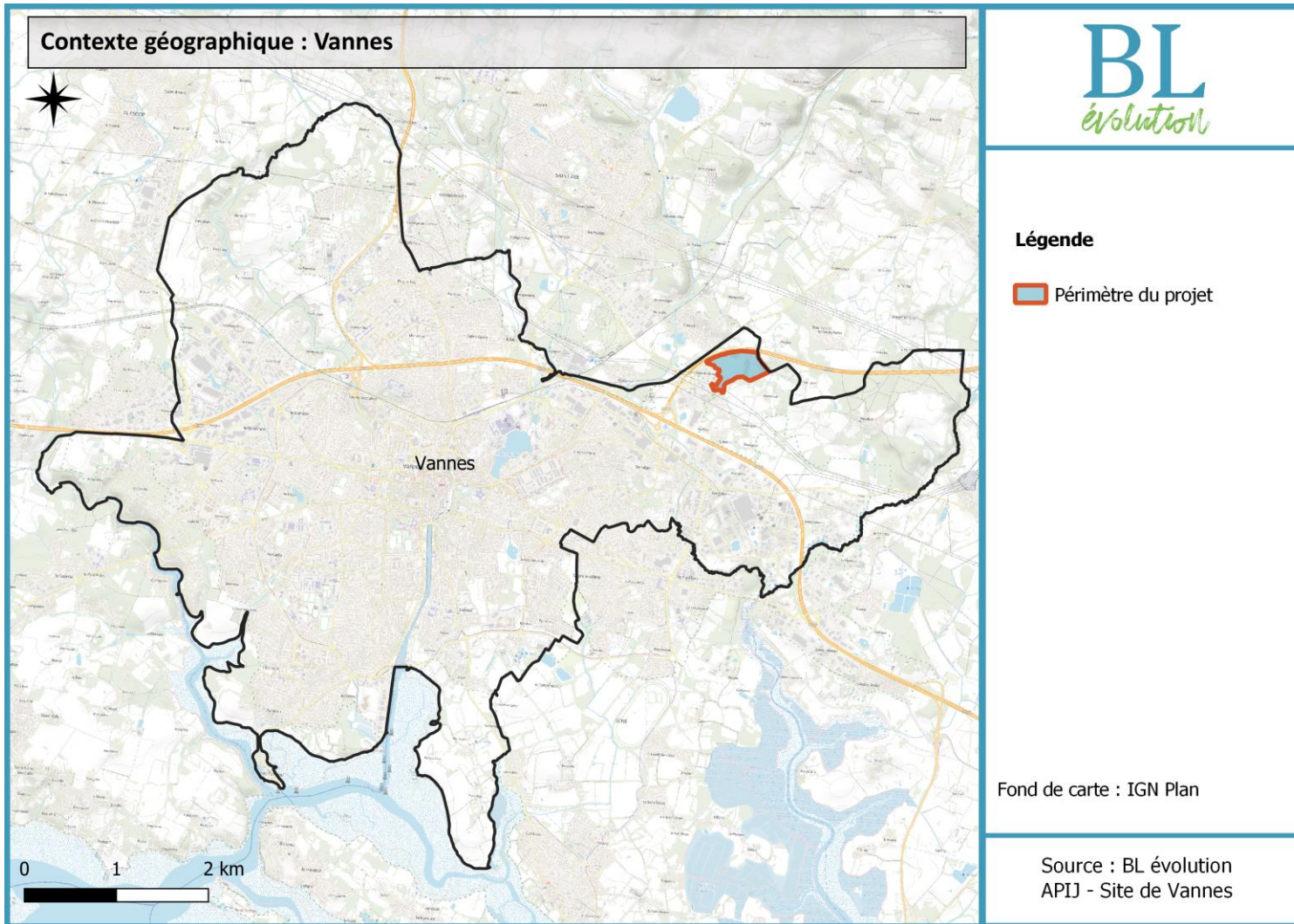
- La **magnitude par arc seconde** : peut-être la plus complexe des mesures, la magnitude par arc seconde est une donnée issue de l'astrophysique, qui correspond à une mesure de la *brillance d'une surface* d'un corps céleste et qui désigne la densité de flux reçue par unité d'angle solide. **Il faut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



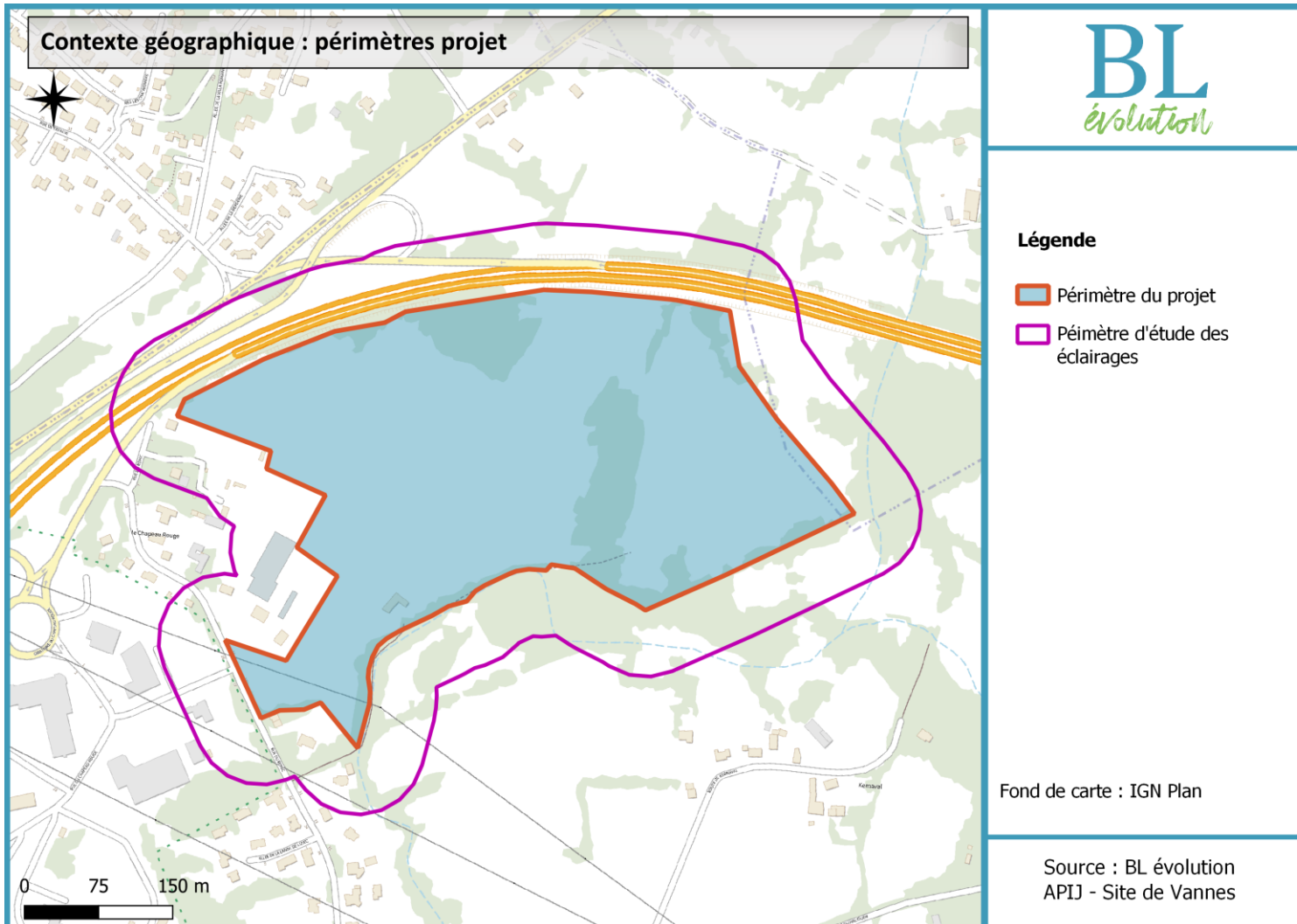
Ce travail entre dans le cadre de l'étude d'impact commandée par l'APIJ (Agence Publique pour l'Immobilier de la Justice). *BL évolution* a été sollicité pour étudier l'influence du futur projet sur l'environnement nocturne local dans le cadre de la production de pollution lumineuse. Cette étude se justifie 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.

Le site étudié se situe à l'extrémité nord-est de la commune de Vannes, au nord de la zone d'activité « Le Chapeau Rouge », au nord de la RN165 et au sud de la RN166.

Le projet d'établissement pénitentiaire s'inscrit sur un terrain de 15,8 ha dont l'ensemble des parcelles appartient à la Ville de Vannes, à l'exception d'une parcelle (n°131) qui a été rajoutée et qui n'appartient pas à la Ville.

Le site est actuellement occupé par une zone ouest essentiellement herbacée (en voie de colonisation par des fourrés), et une zone largement colonisée par des fourrés (évoluant vers le boisement à terme).

Définition des périmètres

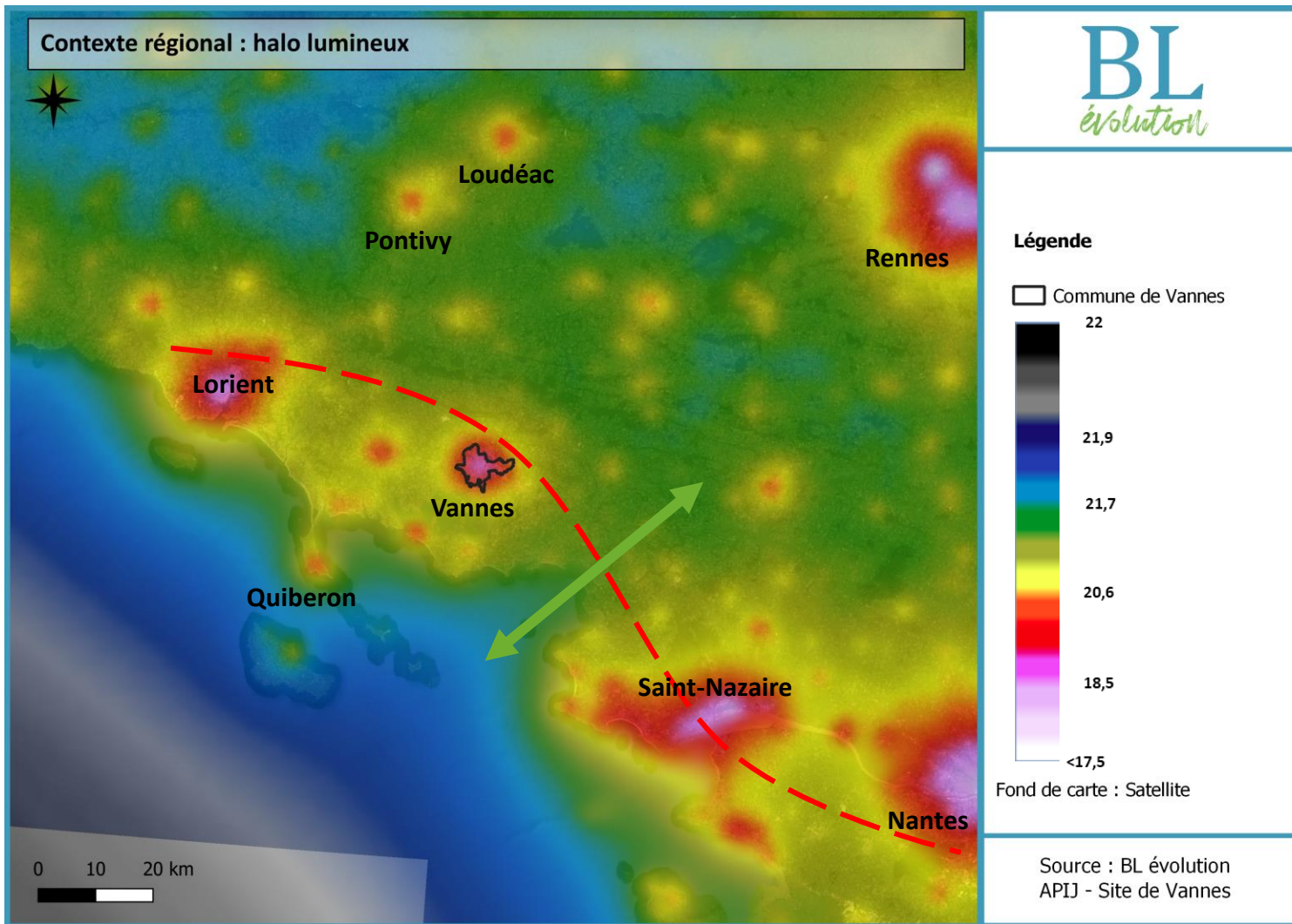


Dans le cadre de l'étude de la pollution lumineuse, différents périmètres d'étude ont été définis pour mener le travail de spatialisation et de compréhension des enjeux nocturnes.

- Périmètre du projet : périmètre du site d'étude transmis en amont et analysé dans le présent document.
- Périmètre d'étude des éclairages : le périmètre rapproché est un tampon de 100 mètres au-delà du périmètre défini pour le projet.

Au-delà de ce dernier, les éclairages à proximité ne devraient pas avoir d'influence sur la qualité de l'obscurité et de pollution lumineuse directe au sein du périmètre du projet. Néanmoins, certains points lumineux ponctuels peuvent avoir une influence. C'est le cas par exemple de spots privés. Si des éclairages sont présents, ils peuvent être étudiés au-delà de ce périmètre.

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.

Le site se situe au sein du halo lumineux de l'agglomération de Vannes, une des principales sources de pollution lumineuse à proximité. On note une certaine continuité sur l'ensemble de la côte atlantique entre Lorient et Saint-Nazaire. Cette continuité reste assez peu intense entre les agglomérations.

Donc, à une échelle régionale, il existe une certaine obscurité entre Vannes et Saint-Nazaire, qui peut se montrer comme un axe propice pour des migrations à grande échelle, comme celle des oiseaux migrateurs.

Au nord de cette ligne et à l'ouest de Pontivy, il existe un ciel de bonne qualité.

L'état initial de l'environnement nocturne

Analyse des données

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

Analyse des éclairages

Au total, 20 sources de lumière artificielle ont été recensées au cours de la collecte de données, dans un périmètre d'environ 200 mètres. Ce chiffre se veut être le plus exhaustif possible, il exclut cependant les possibles éclairages appartenant au domaine privé inaccessibles, ou des sources qui n'étaient pas en état de fonctionnement au cours de la collecte. Si le périmètre du projet ne dispose d'aucun point lumineux directement sur son périmètre, plusieurs sources sont présentes au sud. A noter que tous les autres axes routiers à proximité ne disposent d'aucune source d'éclairage.

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

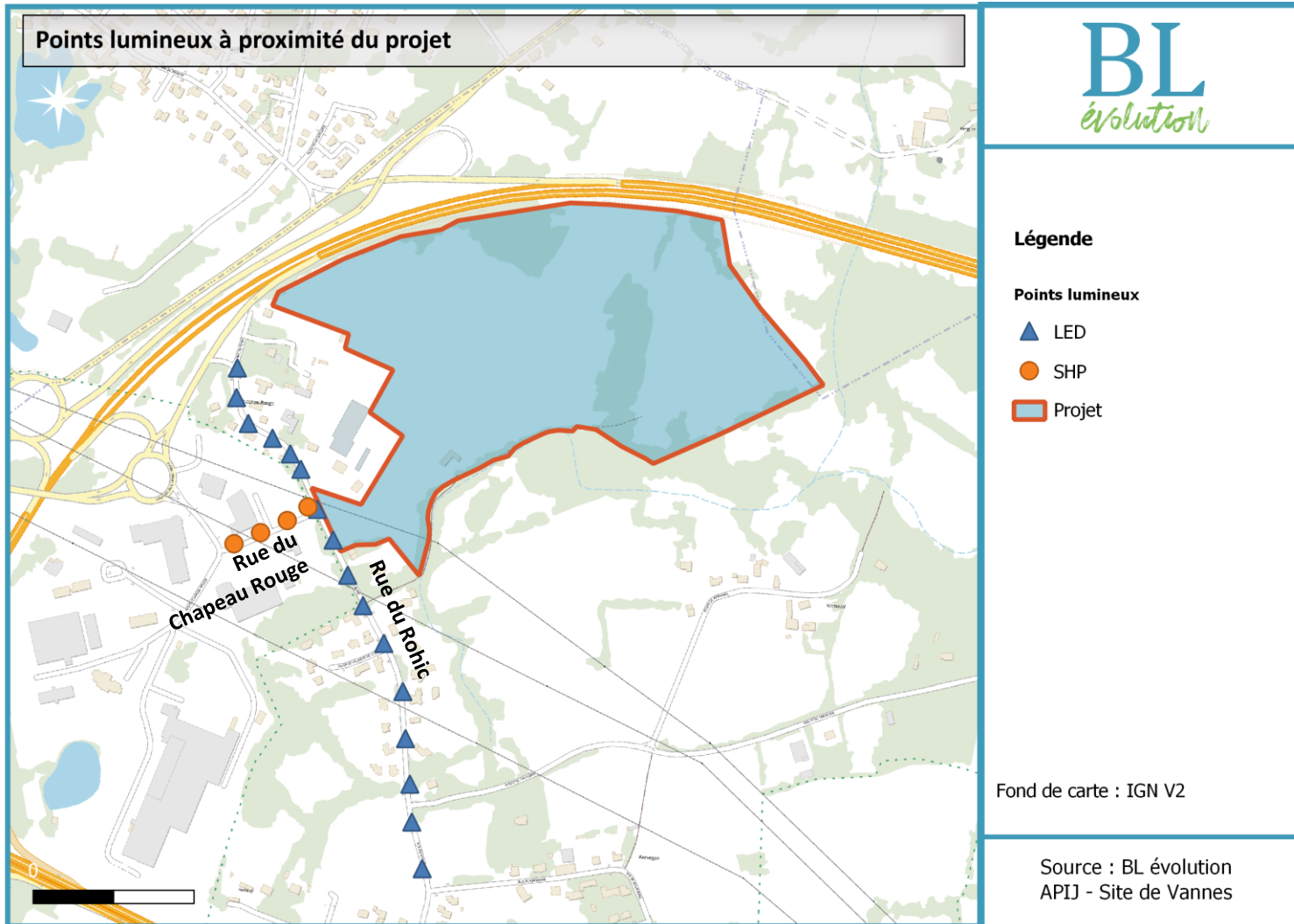
- Des ampoules LED ;
- Des ampoules SHP.

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

A noter que ces éclairages s'éteignent à minuit.

Eclairage voirie	
	
<p>Les éclairages de voirie sont des lampadaires classiques, avec une maîtrise des flux dépendant de la hauteur et une puissance variable.</p>	
<p>10 sources identifiées de type LED :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Intensité faible • Hauteur faible (6m) • Lumière blanche (3000K) • ULOR 0% <p>Indice pollution lumineuse : moyen</p>	<p>4 sources identifiées de type SHP :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Intensité faible • Hauteur moyenne (8m) • Lumière orange • ULOR 5% <p>Indice pollution lumineuse : faible</p>

Cartographie des éclairages



L'ensemble des sources identifiées se situent au sud et sud-est du périmètre d'étude.

- Les éclairages LED sont présents sur la rue du Rohic qui longe le périmètre du projet.
- Les éclairages SHP se situent sur la rue du Chapeau Rouge.

3 points lumineux sont particulièrement proches des limites sud-est du projet.

Le reste du territoire d'étude proche reste épargné par la présence d'éclairage.

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

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

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

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

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

Interprétation :

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

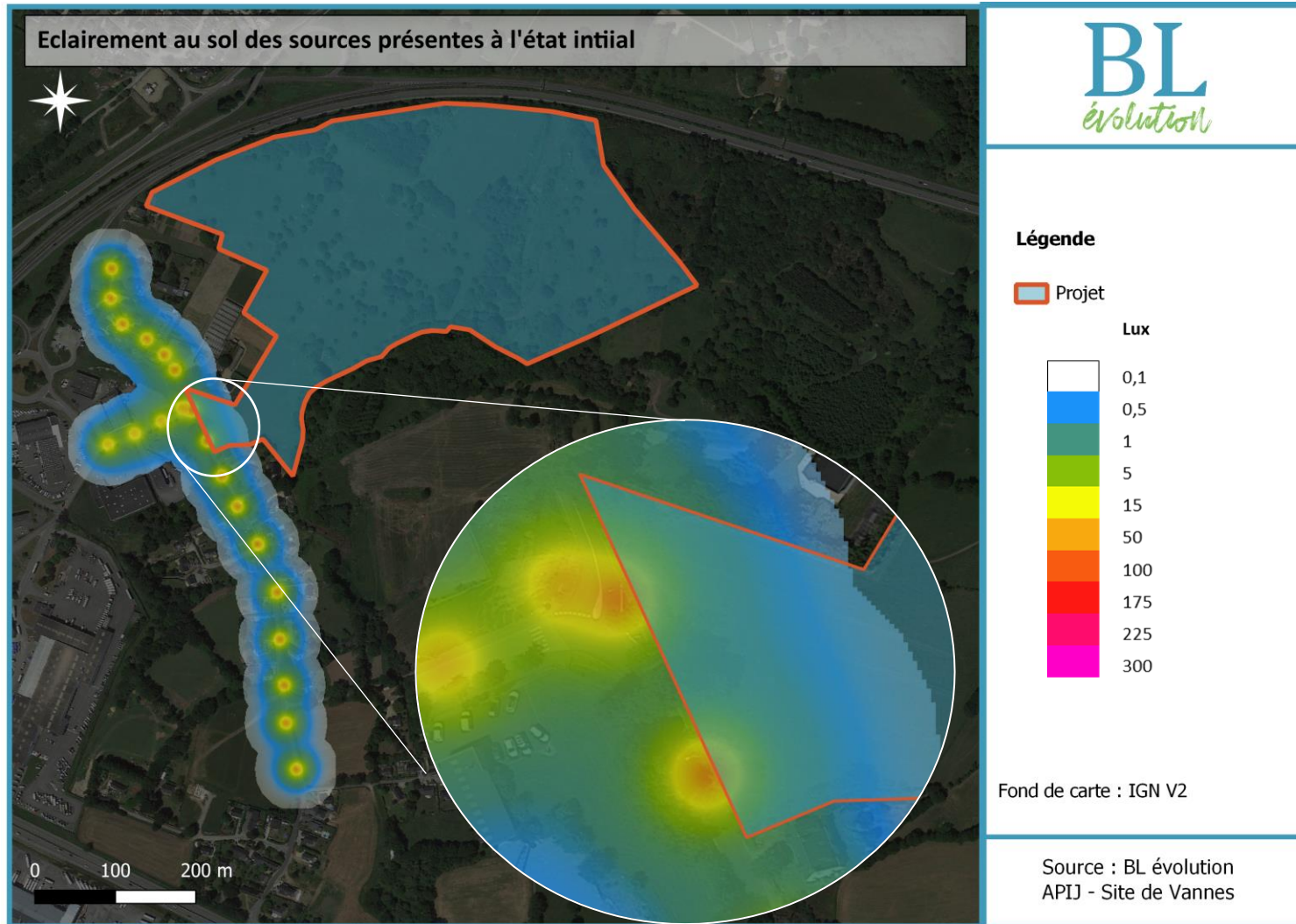
- Les sources lumineuses sont considérées lambertiennes. C'est-à-dire qu'il s'agit d'une source lumineuse dont la luminance est identique dans toutes les directions. Les possibles orientations des flux lumineux, qui nécessiteraient une exploration nettement plus importante (connaître la marque et le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

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

L'éclairement moyen du site :

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

Modélisation de l'éclairage



La modélisation de l'éclairage montre une influence relativement restreinte de la pollution lumineuse directe à l'état initial.

Les éclairages des rues du Rohic et du Chapeau Rouge vont impliquer un éclairage qui empiète sur le périmètre du projet au niveau du sud-ouest. Espace qui est projeté comme une future voie d'accès à l'établissement.

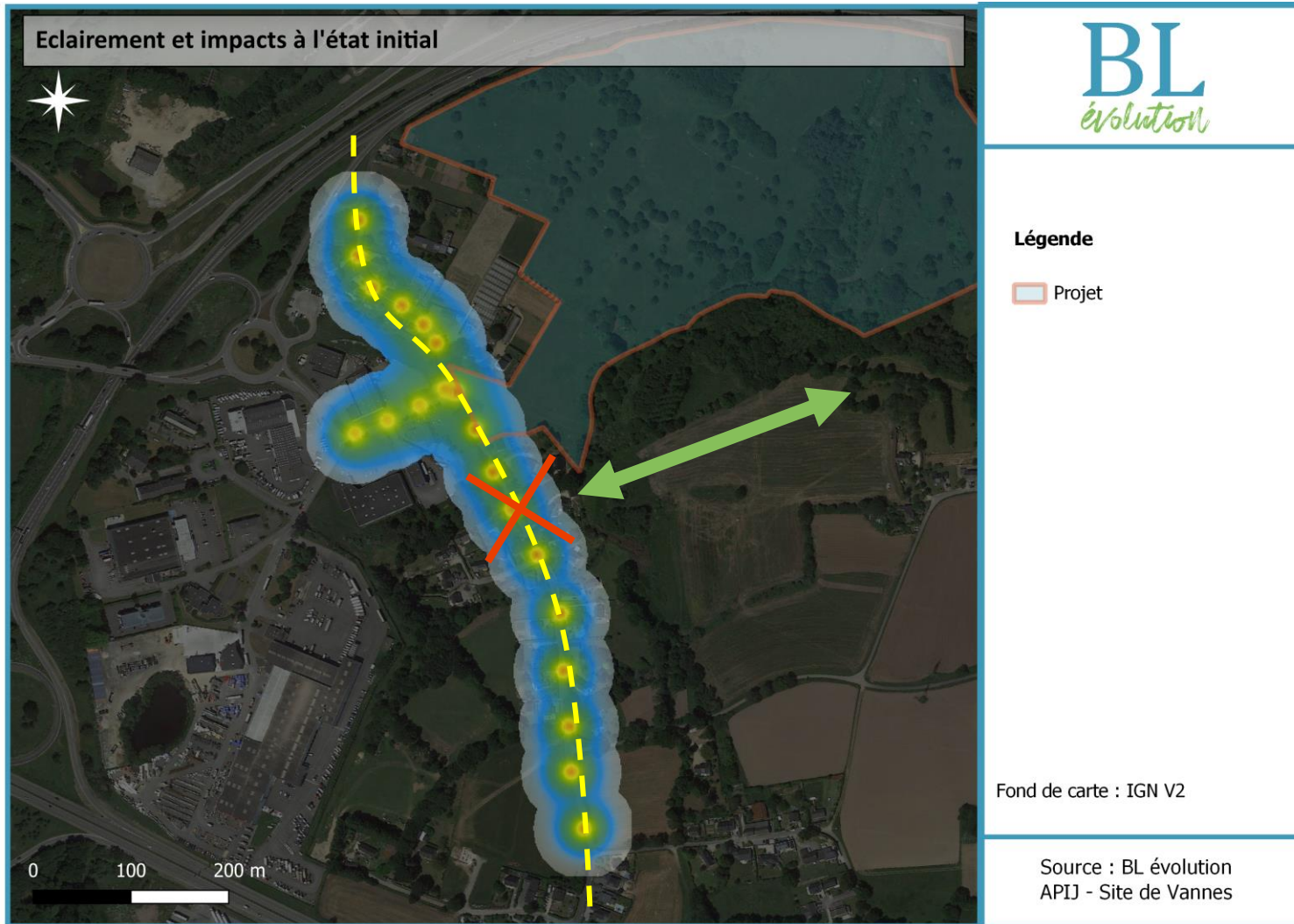
Cette partie du périmètre du projet se situe au niveau du croisement des deux rues qui cumule plusieurs sources de lumière. Cette densité de points lumineux plus élevée implique une superposition de d'éclairage qui s'additionnent, faisant apparaître un espace plus lumineux que le reste de la zone d'étude.

Ainsi, la partie sud-ouest du projet est la plus exposée à la pollution lumineuse directe à l'état initial.

Le reste du périmètre, dont la route au nord du périmètre, est entièrement épargné par la pollution lumineuse directe.

A partir de minuit, plus aucune pollution lumineuse directe n'est présente sur le périmètre du projet car les lampadaires sont éteints.

Impact de la pollution lumineuse directe à l'état initial



Il existe **une continuité nord-sud d'éclairage**, sur la rue du Rohic.

Au-delà d'impliquer un éclairage direct à l'intérieur du projet, cette continuité peut impliquer une barrière écologique artificielle du point de vue de la pollution lumineuse (trame noire).

Dans ce sens, la présence de cette continuité se présente comme un obstacle aux migrations potentielles en direction de l'ouest.

L'ouest étant un espace urbanisé, d'autres enjeux d'artificialisation des sols viennent s'ajouter à cette problématique. Cette continuité d'éclairage est surtout à considérer comme un facteur de pression supplémentaire à la cohérence des écosystèmes.

A partir de minuit, ces éclairages n'apparaissent plus comme un obstacle.

Définition d'une situation de référence

Pour étudier la pollution lumineuse indirecte, une campagne de mesure a été menée avec un appareil SQM. 23 mesures ont été prises au total. Pour rappel, l'étude se fait par deux types de données :

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

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

Les résultats de la prise longue 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

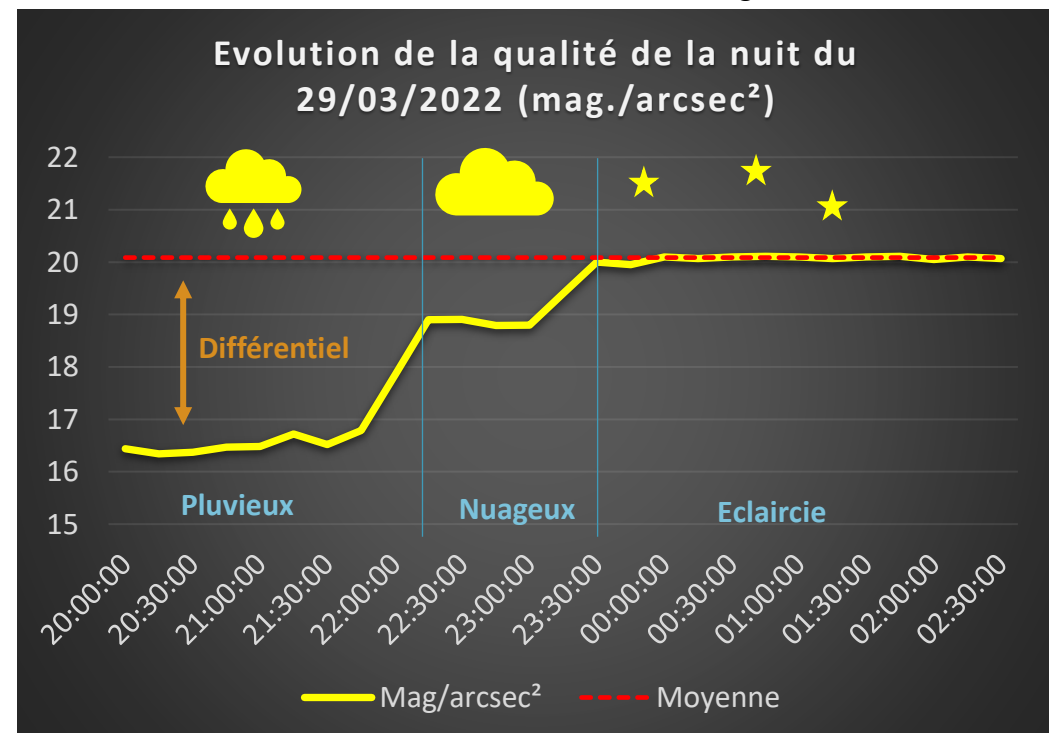
Le graphique ci-contre reprend l'évolution de la qualité de l'obscurité durant toute la période de collecte effectuée à Vannes la nuit du 29/03/2022. La collecte de données a démarré à partir de 20h00 et s'est terminée aux alentours de 2h30 du matin. La situation a été particulièrement instable lors de la nuit de mesure, avec une première période pluvieuse, puis nuageuse et enfin une belle éclaircie, sans nuage, est venue compléter la nuit.

Durant la première période, aucune mesure n'a été effectuée en présence de la pluie qui ne permet pas d'avoir de résultats satisfaisants. La deuxième période nuageuse se montre déjà plus intéressante pour la prise de mesure, mais cela a impliqué des réajustements par rapport à la situation de référence.

Puis, le vent apparu autour de 23h15 a laissé la place à un ciel particulièrement dégagé, idéal pour la prise de mesure, nécessitant aucun réajustement.

La prise de mesures ponctuelles a officiellement démarré aux alentours de 22h45.

La situation de référence se situe autour de 20,10 mag./arcsec².



Le principe de réajustement

Un réajustement pour éliminer les biais issus de la présence de nuages

A cause de la présence de nuages en début de nuit, un réajustement est nécessaire, car une couverture nuageuse, qui reflète la lumière des villes, **perturbe les mesures**.

Grâce à la prise de mesure longue, **nous connaissons l'intensité du biais engendrée par les nuages** (la différence entre les mesures sous couverture nuageuse et la moyenne sans nuage) à chaque moment de la nuit.

Cet écart correspond au différentiel.

Application du différentiel aux mesures ponctuelles

Pour les mesures ponctuelles, nous enregistrons également **l'heure exacte à laquelle elles sont prises**.

Si la donnée ponctuelle est prise avec une présence nuageuse, cela implique qu'elle est surestimée. Donc avec un ciel plus brillant qu'une situation « normale » de référence.

Ainsi, pour toutes ces mesures ponctuelles prises pendant une période nuageuse, **nous appliquons le différentiel exact en fonction de l'heure à laquelle elles ont été prises**.

Cela va nous permettre d'éliminer les biais issus de la présence de nuages pour les mesures ponctuelles.

Par exemple

Concernant les mesures longues :

- Les **données enregistrées** indiquent : 19,41 mag/arcsec² à **23h30** à cause de la présence de nuages.
- La **situation de référence** pour la nuit est de **20,10 mag/arcsec²** sans nuage.
- Donc à **23h30**, il existe un **différentiel** de **0,69 mag/arcsec²** par rapport à la situation de référence (20,10 - 19,41).

Concernant la mesure ponctuelle :

- La **donnée ponctuelle** enregistrée à **23h30** est de 20,04 mag/arcsec² avec la présence de nuage.
- Nous ajoutons le différentiel de **0,69 mag/arcsec²** pour ajuster la donnée ponctuelle, soit : $20,04 + 0,69 = 20,73 \text{ mag/arcsec}^2$ afin de **considérer une situation sans nuage**.
- **La donnée retenue est donc 20,73 mag/arcsec².**

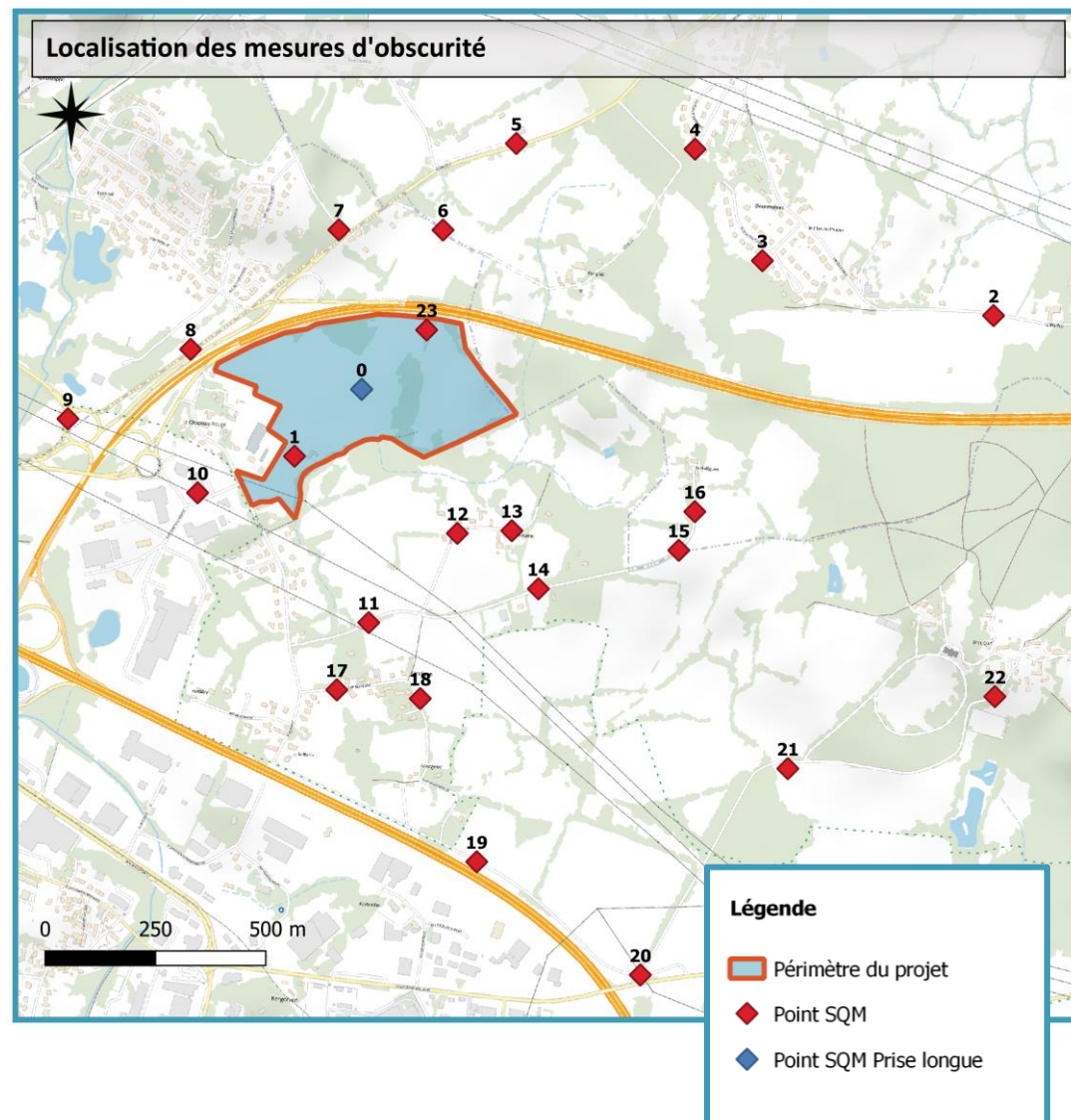
Nous appliquons le différentiel équivalent à toutes les mesures qui ont été prises pendant la période nuageuse. Cette solution nous permet d'estimer la situation s'il n'y avait pas de nuages, pour un résultat homogène.

Données d'obscurité récoltées

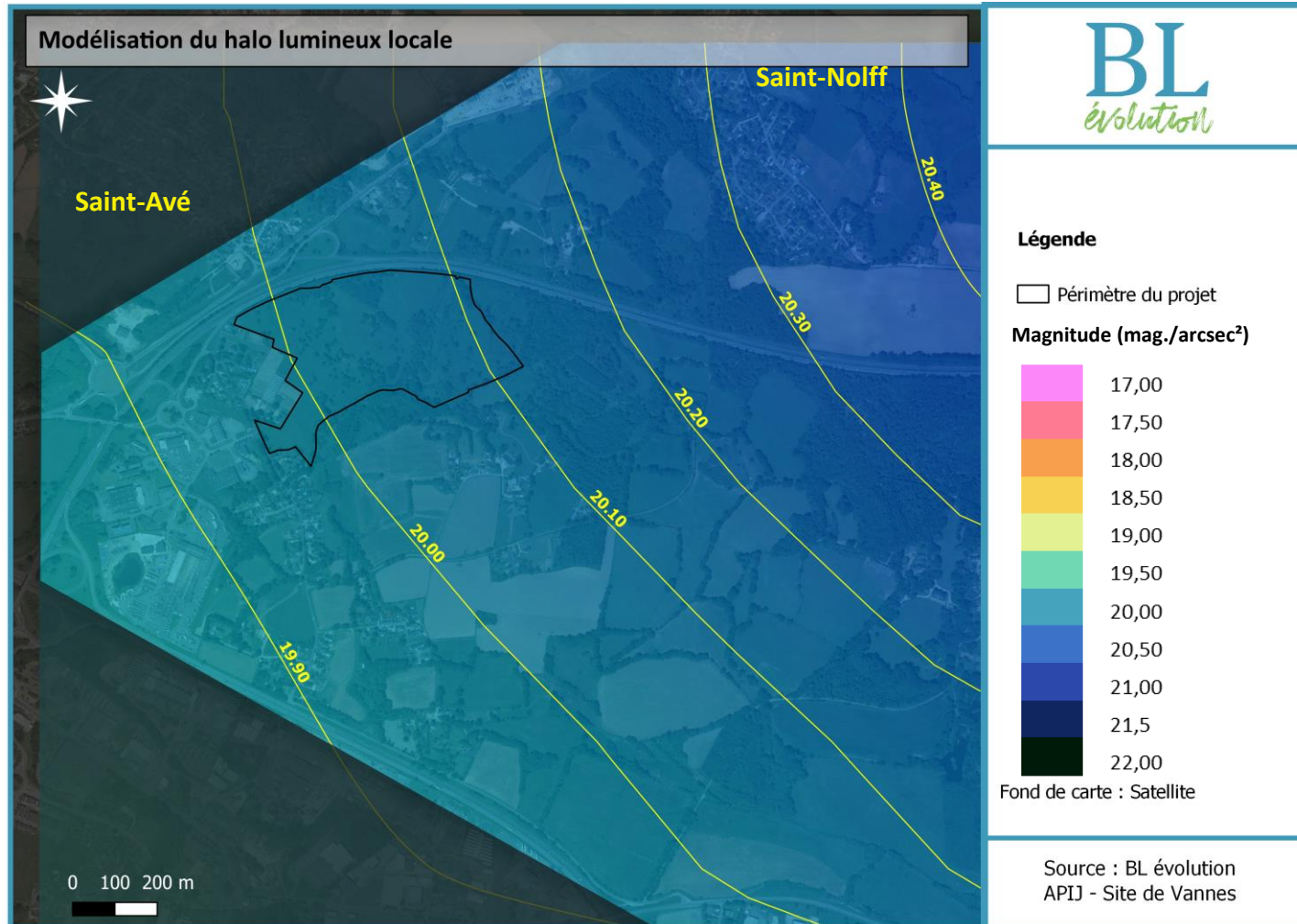
Le réajustement a été effectué sur 7 points de mesures :

ID	Mesures brutes	Réajustement	Mesures retenues
1	18,91	1,19	20,10
3	19,63	1,18	20,81
2	18,96	1,20	20,16
4	19,50	1,19	20,69
5	20,04	0,69	20,73
6	20,41	0,09	20,50
7	20,28	0,14	20,42
8	20,01	0	20,01
9	19,78	0	19,78
11	20,03	0	20,03
12	20,24	0	20,24
13	20	0	20,00
14	19,91	0	19,91
15	20,22	0	20,22
16	20,24	0	20,24
17	19,82	0	19,82
18	19,47	0	19,47
19	19,18	0	19,18
20	20,14	0	20,14
21	20,58	0	20,58
22	20,13	0	20,13
10	19,95	0	19,95
23	20,10	0	20,10
LU DL (0)		20,10	

Carte des points de mesures :



Modélisation de la pollution lumineuse indirecte



Carte de la modélisation de l'obscurité

La modélisation du halo lumineux local montre une qualité d'obscurité du ciel oscillant entre 19,90 mag/arcsec² à l'ouest du territoire et 20,40 mag/arcsec² au nord-est. Il s'agit d'un ciel typique des zones proches d'agglomérations, où le halo lumineux commence à se dissiper.

Le halo lumineux est le plus important au sud-ouest, au niveau de la zone d'activité de Chapeau-Rouge.

La partie nord-ouest correspond à l'unité urbaine de Saint-Avé qui reste légèrement perceptible.

Les zones urbaines du nord, qui se situent sur la commune de Saint-Nolff, ne sont pas du tout perceptibles en terme de halo lumineux. En effet, aucun point lumineux n'a été identifié au moment de la prise de mesure. Ainsi, le halo lumineux reste de meilleure qualité sur cette zone.

On notera une évolution plutôt régulière de la qualité de l'obscurité du ciel sur le territoire, qui s'améliore en direction du nord-est.

De manière générale, la qualité de l'obscurité à l'état initial reste dégradée sur le périmètre du projet.

Confirmation de la modélisation

Méthodologie et interprétation

La modélisation du halo lumineux 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.

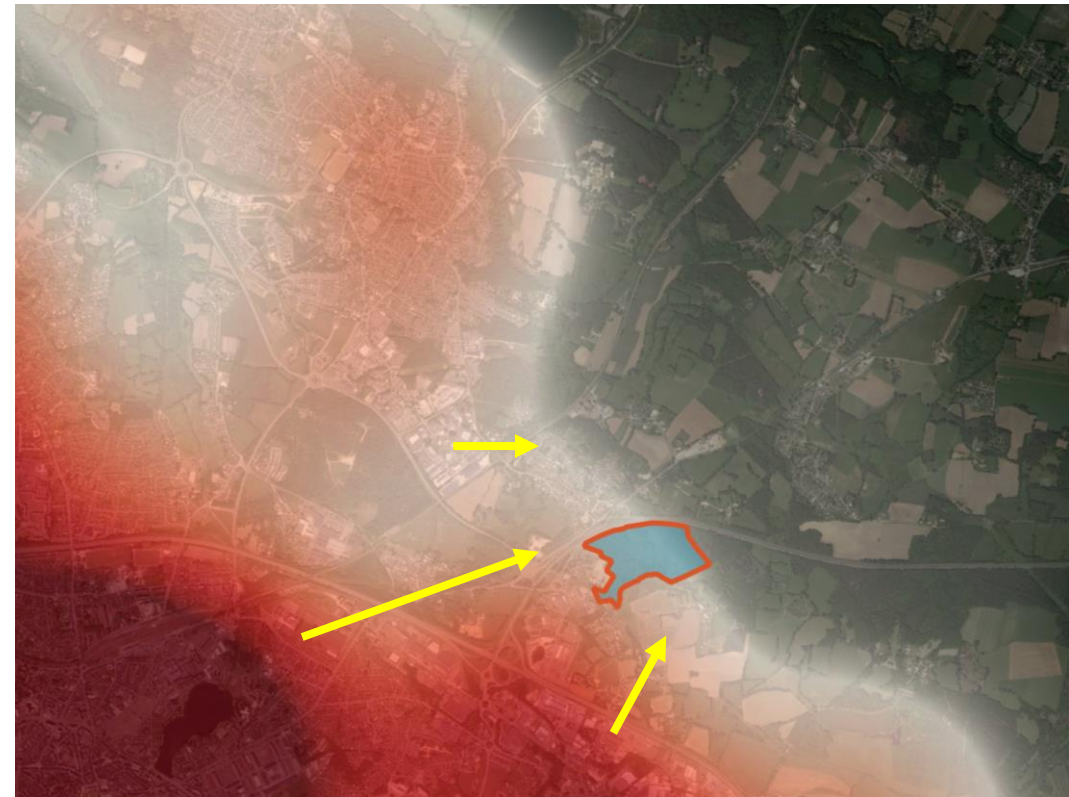
Une méthode qui permet d'estimer le halo lumineux dans son ensemble à partir des mesures ponctuelles effectuées sur le terrain.

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 uniquement par la présence de l'agglomération de Vannes et des espaces urbains à proximité. L'analyse des radiances confirme l'absence de lumière sur la partie nord-est.

La principale source d'altération de l'obscurité sur le territoire d'étude s'explique ainsi par **un halo lumineux global venant des espaces urbains de Vannes**. L'agglomération urbaine de Saint-Avé reste une nouvelle fois perceptible mais peu intense. Ce qui crée une ambiance lumineuse continue qui va progressivement s'estomper en direction du nord-est.



Analyses des enjeux à l'état initial

Enjeux écologiques :

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

- Diagnostic écologique : rapport final, juillet 2022, Ouest Am.
- Etude de faisabilité Maison d'Arrêt de Vannes – Site de Chapeau Rouge, septembre 2021, EGIS.

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.

Au sein de cette première partie, une première définition des enjeux est établie pour rendre compte des potentiels impacts. Il est recherché l'identification des enjeux spatialisés des habitats, des zonages réglementaires et de mettre en avant les commentaires quant aux espèces identifiées dans l'étude écologique.

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.

Récupération des données :

Les données étudiées ici, représentent une synthèse des observations faites sur le terrain, à l'occasion des relevés naturalistes. Cette analyse a été complétée à partir des données finalisée dans le volet écologique de l'étude d'impact pour le projet de construction d'un centre pénitentiaire sur le site de Chapeau-Rouge pour la commune de Vannes.

Méthodologie

La méthode utilisée dans cette présente étude consiste à reprendre les principaux enjeux connus sur la faune, la flore, les habitats et la cohérence des écosystèmes sur le périmètre du projet. Ces principaux enjeux, formulés sous forme de synthèses, sont comparés ensuite aux enjeux de pollution lumineuse connus sur les espèces et les milieux présents.

Pour chaque espèce à enjeux, nous recherchons à connaître leurs principales réponses à une mise en lumière, en considérant la pollution lumineuse directe et la pollution lumineuse indirecte.

L'étude des impacts, qui sera établie à partir de la simulation des éclairagements du projet, devra permettre de les mettre en situation face à la pollution lumineuse produite par le futur projet.

Enjeux sur la biodiversité : faune/flore

Les données étudiées ici, représentent une synthèse des observations faites sur le terrain, à l'occasion des relevés naturalistes présentée dans l'étude écologique.

Taxons	Caractéristiques	Conclusions du rapport
Amphibiens	4 espèces recensées	Ces quatre espèces sont communes, mais elles sont toutes protégées. Une espèce est identifiée comme quasi-menacée : le triton marbré
Reptiles	3 espèces recensées	Trois espèces ont été recensées durant les investigations, plus une probabilité de présence de la couleuvre helvétique. La vipère péliade est classé vulnérable et en danger sur la Bretagne.
Mammifères terrestre	14 espèces recensées	Essentiellement des espèces communes et non menacées, sauf le lapin de garenne (« quasi menacée »)
Chiroptères	6 espèces recensées	Diversité intéressante, 4 espèces sur 6 sont quasi-menacées (3 sur la liste rouge Bretagne et 4 sur la liste rouge France)
Oiseaux	49 espèces d'oiseaux recensées	Diversité assez forte, la plupart sont des espèces communes et non menacées. Il y a 14 espèces qui figurent sur la liste des espèces menacées (6 espèces vulnérables et 8 espèces quasi-menacées)
Odonate	6 espèces recensées	Faible diversité car pas de milieu aquatique favorable. Toutes les espèces rencontrées sont communes et aucune n'est protégée.
Rhopalocères	25 espèces recensées (aucune investigation des papillons de nuit n'a été effectuée)	Diversité assez élevée, la prairie à l'ouest semble la plus favorable. Aucune des espèces inventoriées n'est protégée.
Orthoptères	16 espèces recensées	Forte diversité, mais toutes les espèces identifiées sont communes
Autres invertébrés	22 espèces recensées	La diversité obtenue pour les autres groupes taxonomiques n'est pas significative, car ils n'ont pas fait l'objet d'une recherche ciblée visant l'exhaustivité. Deux espèces figurent en annexe 2 de la Directive Habitats

Enjeux faunistiques et pollution lumineuse

Etat des lieux des connaissances sur les enjeux de pollution lumineuse et la réponse des espèces identifiées.

Taxons	Enjeux de pollution lumineuse	Réponse des espèces
Amphibiens	Les amphibiens peuvent être fortement touchés par la pollution lumineuse, essentiellement en période de reproduction. Plusieurs espèces ont une période de vie la nuit (salamandre tachetée et tritons)	Fort
Reptiles	Enjeux de pollution lumineuse mal connus	Mal connue
Mammifères terrestre	Les espèces présentes sont essentiellement diurne et commune. Le blaireau et certaines espèces de mulots ont une période de vie qui se déroule en partie la nuit. Mais il s'agit d'espèces communes.	Faible
Chiroptères	De nombreuses espèces de chiroptères sont lucifuges et vont donc fuir la lumière. Seules les pipistrelles communes semblent moins sensibles. Le territoire d'étude présente plusieurs espèces quasi-menacées.	Forte
Oiseaux	Le territoire accueille plusieurs rapaces nocturnes (Chouette hulotte, Effraie des clochers : préoccupation mineure) et des oiseaux migrateurs qui voyagent essentiellement de nuit.	Forte
Odonate	Habitats peu favorables. Les odonates peuvent être perturbées par la lumière, notamment par des effets combinés, comme la difficulté de trouver de la nourriture.	Insecte : Forte
Rhopalocères	Aucune investigation des papillons de nuit n'a été effectuée, néanmoins, la diversification des espèces diurnes recensées peut être un indicateur de la présence d'espèces nocturnes	
Orthoptères	Comme les odonates, les orthoptères sont sensibles plutôt par effets cumulés	
Autres invertébrés	Les espèces identifiées ne semblent pas présenter d'enjeux directs à la pollution lumineuse. Néanmoins, la richesse d'insectes diurnes peut être indicatrice d'une richesse d'insectes nocturnes.	

Le croisement des informations, montrent que les principaux enjeux sur le périmètre s'orientent sur les chiroptères, l'avifaune, les amphibiens et les insectes. Ils restent plus faibles pour les pour les mammifères terrestres identifiés.

Patrimoine naturel:

Le site d'implantation du futur établissement pénitentiaire n'est concerné par aucun zonage naturel d'inventaire ou réglementaire (Zone Naturelle d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique ou ZNIEFF, Natura 2000, réserve naturelle, arrêté de protection de biotope, etc.).

Les zonages les plus proches du site d'étude sont :

- La Zone Spéciale de Conservation (ZSC) FR5300029 « Golfe du Morbihan, côte ouest de Rhuys » à 2,3 km au sud ; Cette ZSC est le second plus grand ensemble d'herbiers de zostères de France (après le bassin d'Arcachon), notamment pour *Zostera noltii* (habitat d'intérêt communautaire). C'est également un site d'importance internationale pour l'hivernage et la migration des oiseaux d'eau (site RAMSAR accueillant entre 60 000 et 130 000 oiseaux en hiver).
- La Zone de Protection Spéciale (ZPS) FR5310086 « Golfe du Morbihan » à 2,3 km au sud ; Cette ZPS est une zone humide d'intérêt international (au titre de la convention de RAMSAR) pour les oiseaux d'eau, en particulier comme site d'hivernage.
- La ZNIEFF de type 1 « Marais de Séné » (identifiant 530015664) est la plus proche du site d'implantation du futur établissement pénitentiaire, à 2,3 km au sud : l'intérêt de cette ZNIEFF de 1015,69 ha réside principalement dans l'importance et la concentration des habitats naturels et des espèces remarquables présents dans l'estuaire de Noyal.

- la Réserve des Marais de Séné (FR3600131) qui se situe à 4 km. Ses principaux milieux sont des vasières, des prés-salés, des anciens marais salants (lagunes côtières) et des prairies. La réserve naturelle constitue un pôle de biodiversité pour la flore, les amphibiens et reptiles, et divers groupes d'invertébrés. L'avifaune du site compte 220 espèces, dont 76 nicheuses régulières.
- Autres espaces :
 - Deux Espaces naturels sensibles se situent à 5 km autour du site d'étude ;
 - 1 Zone d'Importance Communautaire des Oiseaux se trouve à 5km.

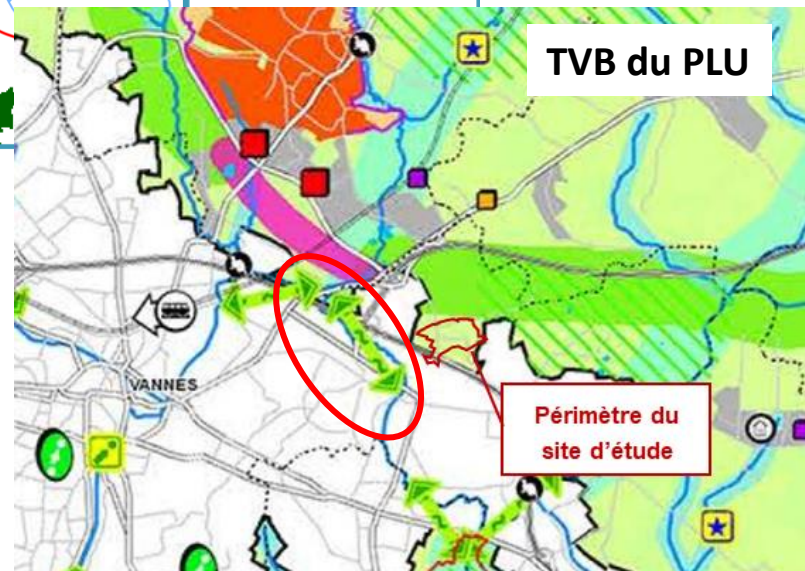
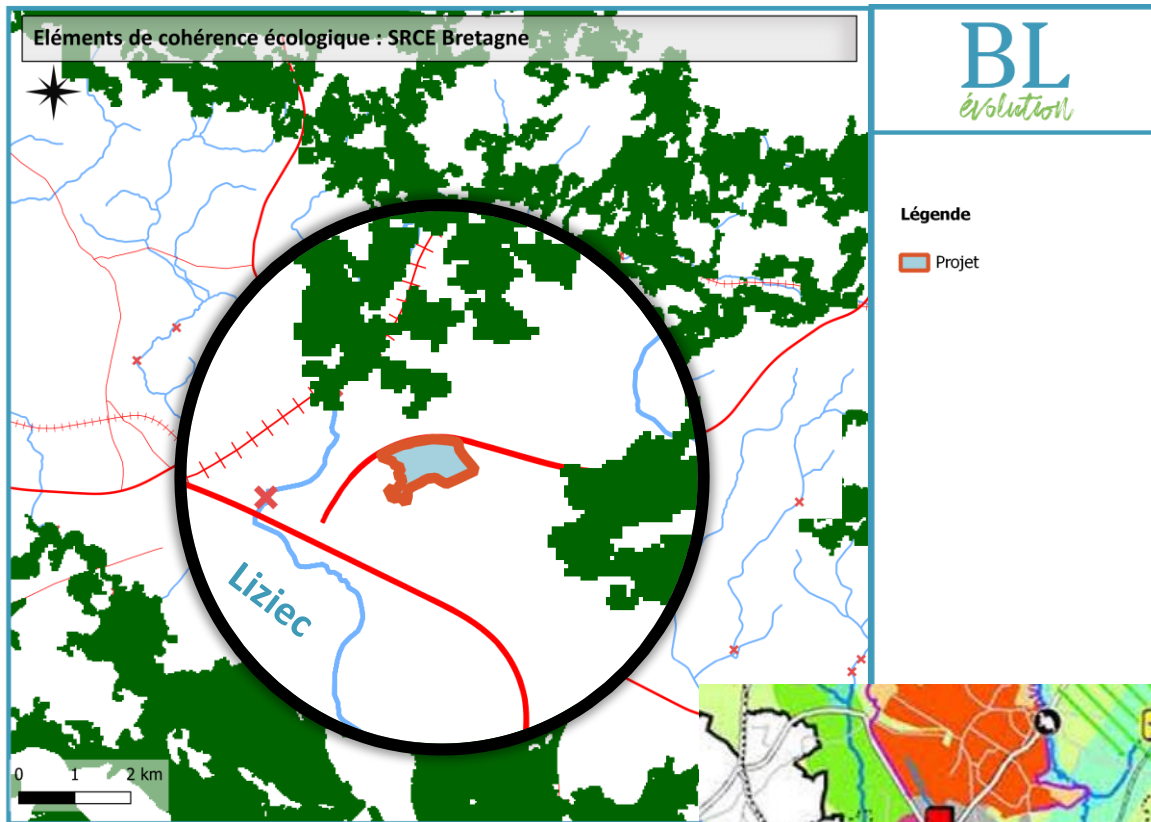
Le périmètre du site d'étude se trouve dans le Parc Naturel Régional (PNR) du Golfe du Morbihan (décret n°2014-1113 du 2 octobre 2014) lequel est soumis à la charte du Parc.

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.

Néanmoins, l'analyse des zonages environnementaux confirme un enjeu sur l'avifaune, notamment l'avifaune migratrice, auquel s'ajoute plusieurs espaces favorables à l'hivernage à proximité du site.

Cohérences écologiques : trames vertes et bleues



Le projet se situe au sein d'une cohérence écologique peu riche, au regard du SRCE Bretagne, et ne se situe pas au sein d'un corridor d'intérêt régional.

Plusieurs réservoirs de biodiversité se trouvent à une distance relative :

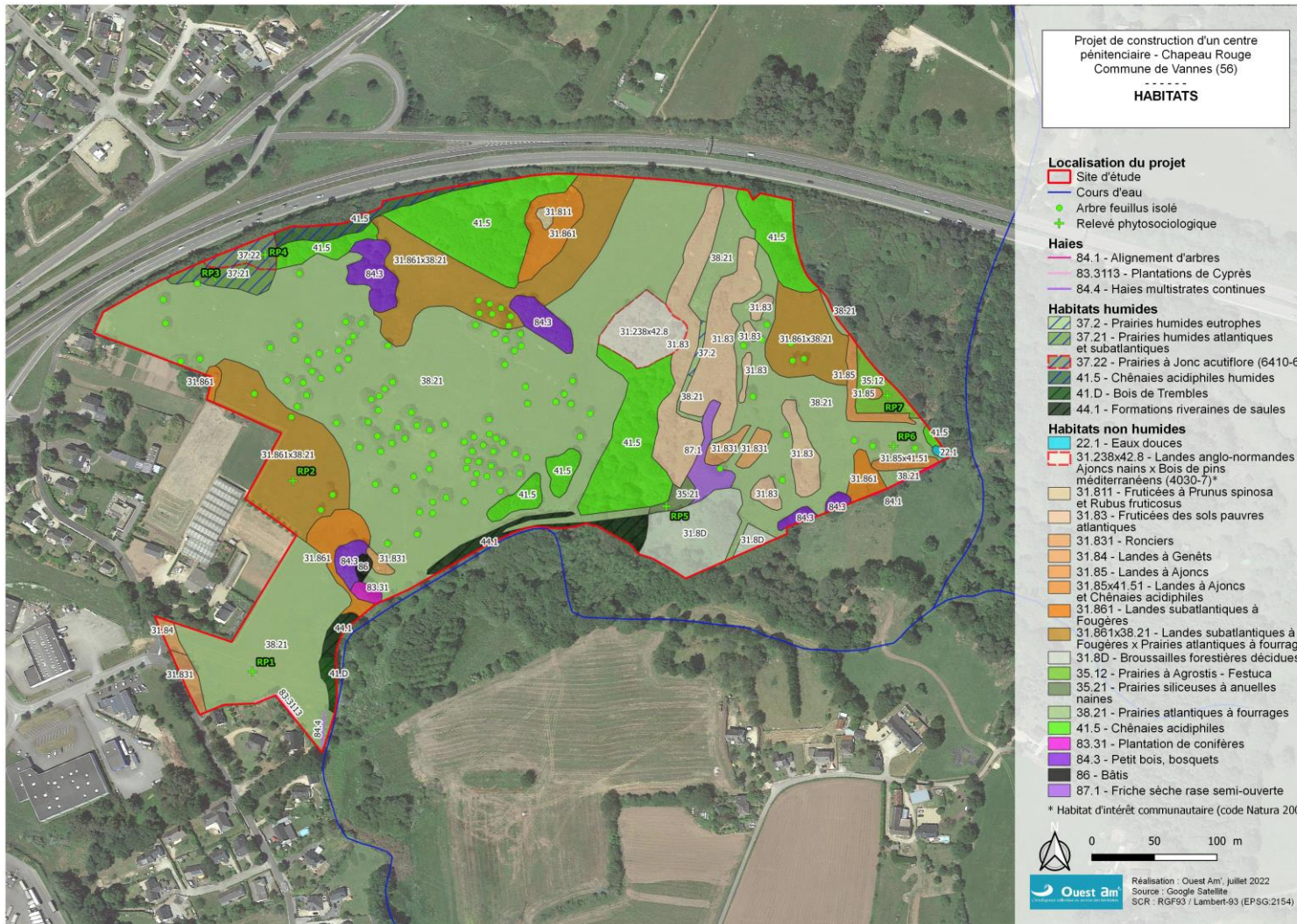
- Au nord : à 200 mètres, mais le périmètre d'étude est séparé de celui-ci par une route identifiée comme un élément fragmentant
- A l'ouest à 600 mètres, sans ruptures identifiées.

Le ruisseau du Liziec est identifié comme un cours d'eau selon la trame bleue régionale. Concernant ce cours d'eau, le PLU de Vannes identifie la trame verte au sud du site d'étude, au niveau des rives du ruisseau du Liziec.

Du point de vue de la trame verte et bleue, le projet d'étude ne présente pas de fortes contraintes. Notamment, car le projet est enclavé entre des infrastructures bloquantes.

Néanmoins, du point de vue de la trame noire, la diffusion lumineuse, qui dépasse les strictes limites, pourrait avoir une influence sur ces éléments. On retiendra des enjeux qui restent néanmoins faibles.

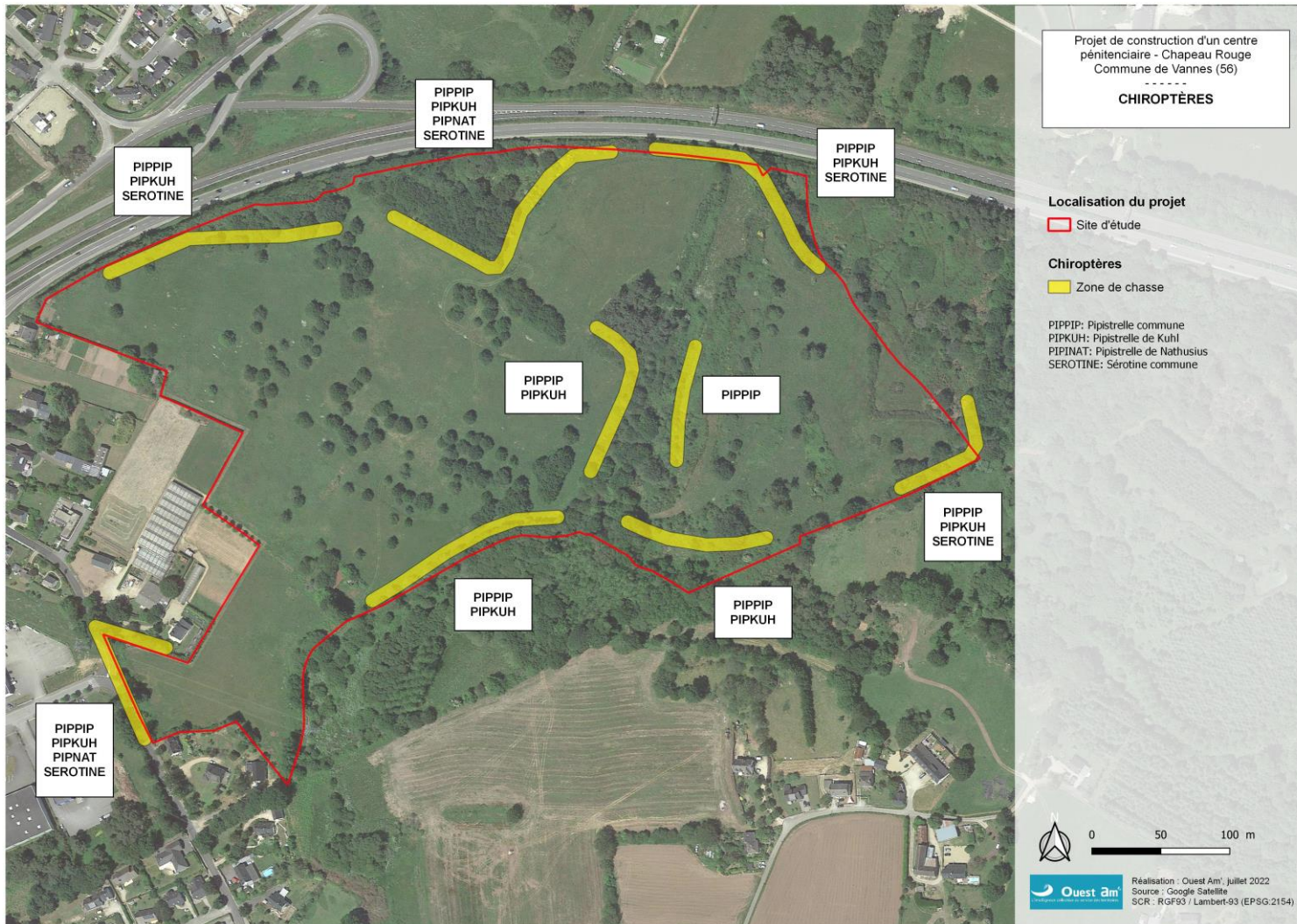
Analyse des habitats



L'étude écologique présente les différents habitats présents sur le périmètre. Plusieurs d'entre eux sont en lien avec les espèces à enjeux vis-à-vis de la pollution lumineuse :

- Les zones humides : au nord et au sud, on retrouve des habitats humides. A noter une mare d'eau douce à l'extrême sud-est du périmètre. Ces espaces sont favorables aux amphibiens mais aussi aux insectes.
- Les zones de prairies avec des arbustes : Ces zones sont particulièrement favorables pour les chiroptères en formant des espaces de chasses privilégiées, notamment en lisières de bois.
- Les bosquets et les haies : favorable aux chiroptères mais aussi aux espèces d'oiseaux qui nichent dans ces zones.
- Les espaces ouverts et semi ouverts, ainsi que les espaces boisés et leurs lisières : ces espaces sont particulièrement importants pour l'ensemble de la faune, dont la faune nocturne (habitats, espaces de transit et couloirs de migration, niches, ...).

Synthèse des enjeux : zoom sur les chiroptères



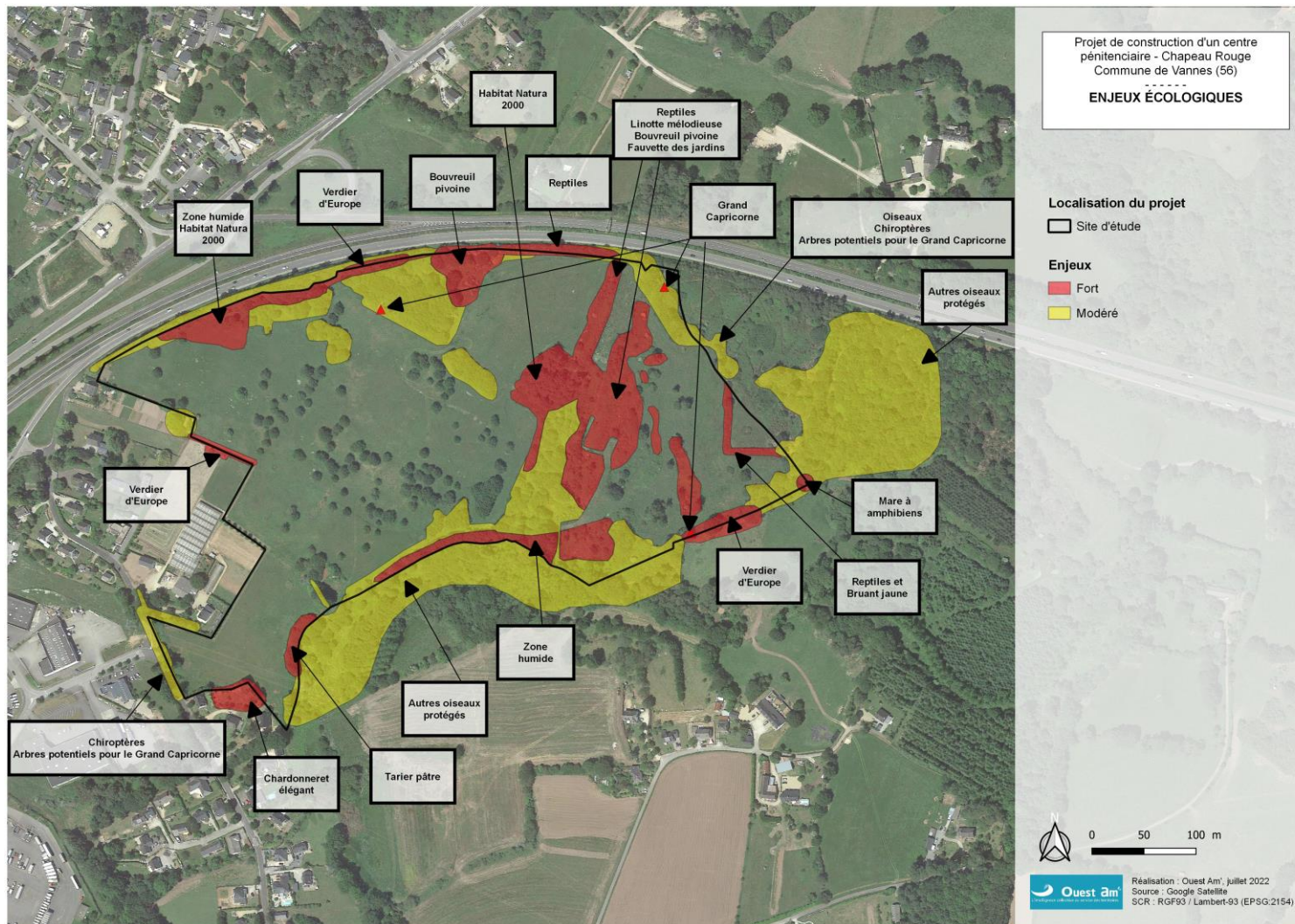
Le diagnostic écologique a permis de mettre en avant les espaces les plus favorables pour les chiroptères. A noter que l'inventaire faune/flore ne permet pas de mettre en avant la présence de niche sur le périmètre. Il s'agit donc d'un espace plutôt privilégié pour la chasse.

Les espaces favorables sont situés plutôt sur les extrémités boisées du périmètre. Il s'agit de zone de lisières boisées, ou bien des linéaires de haie visibles au nord et à l'ouest du périmètre du projet.

Pour la chasse, les pipistrelles, espèce la plus représentée sur le périmètre, semble la moins touchée par la lumière. Les autres espèces sont potentiellement plus sensibles à la présence de lumière artificielle.

Les zones de chasse représentent donc un enjeu vis-à-vis de l'étude de la pollution lumineuse du projet, car si elles sont mises en lumière, elles peuvent perdre de leur intérêts, même si les éléments naturels restent.

Synthèse des enjeux issus de l'étude naturaliste



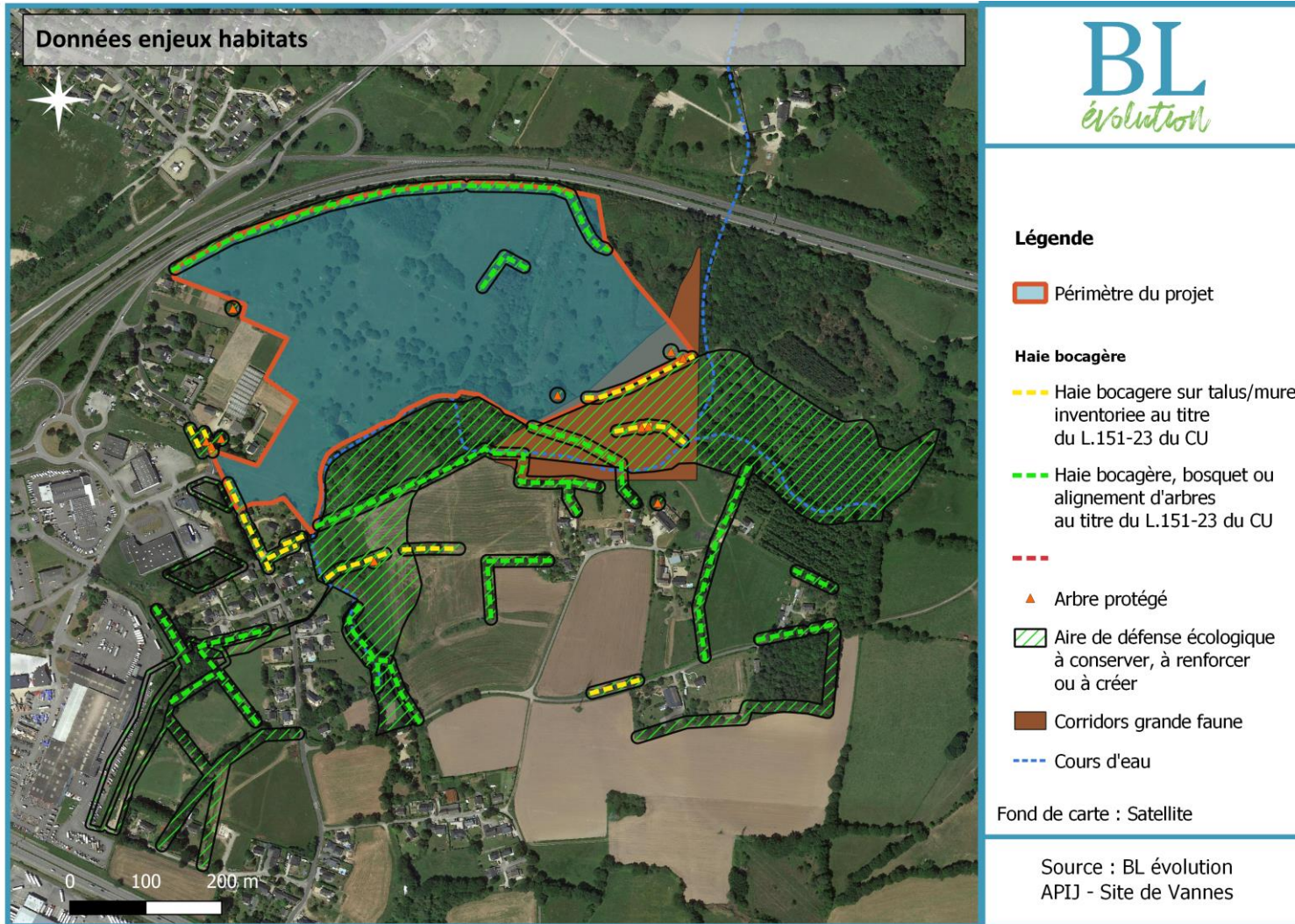
L'ensemble des données des habitats et des inventaires faunistiques du rapport d'étude écologique permet de mettre en avant un zonage des enjeux, classés de forts à modérés.

On notera que le nord est une zone à enjeux plutôt forts, notamment autour des zones humides, des haies et des boisements.

Au sud, les enjeux sont plutôt modérés, mais avec des zones à enjeux forts autour des zones humides. A noter que la mare à amphibiens, au sud-est, est qualifiée avec un enjeu fort.

Des espaces à enjeux modérés sont identifiés à l'extérieur de la zone d'étude., notamment au sud et à l'est.

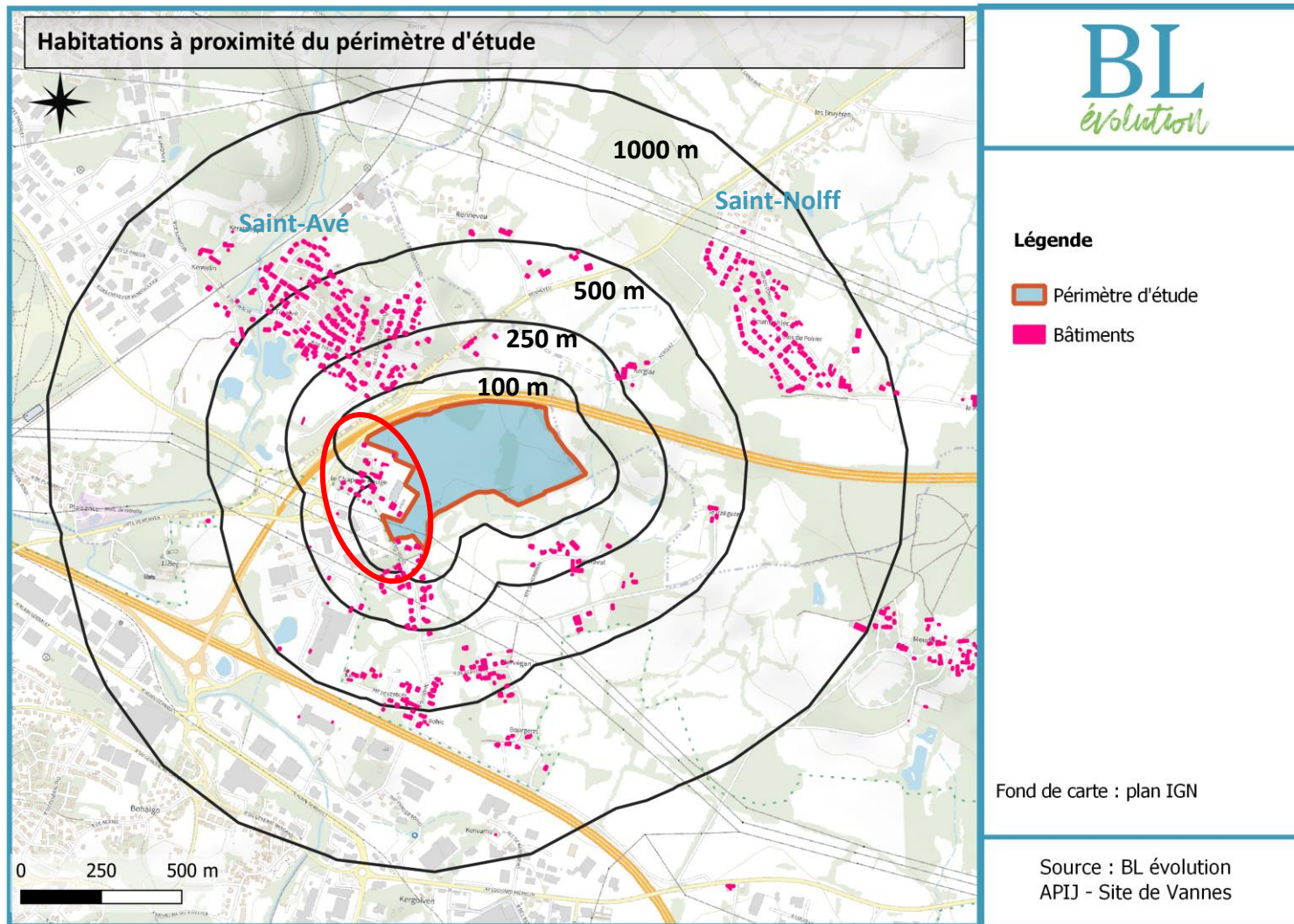
Le centre du périmètre d'étude est aussi concerné par des enjeux forts et modérés.



A partir des données fournies, il reste pertinent de réaliser une analyse qui explore au-delà des strictes limites du projets. En effet, la diffusion potentielle de la pollution lumineuse directe et indirecte peut potentiellement toucher des espaces éloignés.

En plus des résultats du périmètre d'étude, ce complément montre :

- La présence de plusieurs haies qui se situent au sud, au-delà du périmètre. Des haies bocagères (sur talus/murets ou des haies bocagères, bosquet ou alignement d'arbres). Il s'agit d'aires de défense écologique à conserver, à renforcer ou à créer.
- Un cours d'eau (avec un régime intermittent) à la limite sud du périmètre.
- Un corridors à grande faune identifié au sud-est du périmètre.
- Des arbres protégés, identifiés dans des aires de défense écologique à conserver, à renforcer ou à créer.
- Plusieurs aires de défense écologique à conserver, à renforcer ou à créer.



La carte ci-contre présente les bâtiments potentiellement résidentiels à proximité du périmètre d'étude.

Les principaux enjeux pour les riverains se situent à l'ouest du périmètre d'étude, avec des habitations situées dans un rayon de 100 mètres (environ 80 habitants vivent sur cette zone selon les données Filosofi* parmi l'ensemble des bâtiments identifiés par la BD Topo).

Plusieurs bâtiments se situent aussi dans un rayon de 250 mètres. Ces habitations potentielles sont plus nombreuses et sont visibles au sud, à l'ouest et au nord du périmètre d'étude.

Le centre-bourg de Saint-Avé se situe dans un rayon de 500 mètres et au-delà. Le centre-bourg de Saint-Nolff se situent lui dans un rayon de 1 km.

Comme il a déjà pu être mentionné, les bâtiments situés au-delà de 100 mètres sont théoriquement assez éloignés pour ne pas subir d'éclairement direct et de lumières intrusives au sein des lieux de vie.

Obscurité et lumière :

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

- Le site s'inscrit dans une zone sans point lumineux à l'intérieur du périmètre d'étude mais des éclairages à proximité impliquent un éclairage empiétant dans les limites définies du projet. Un ensemble d'éclairages de rues à l'ouest, créé une continuité d'éclairage peu favorable aux déplacements des espèces.
- Les éclairages des rues du Rohic et du Chapeau Rouge sont éteints à minuit.
- La pollution lumineuse indirecte représente aussi un enjeu. En effet, le territoire se situe à l'intérieur du halo lumineux influencé par la ville de Vannes. La qualité du ciel s'améliore en direction du nord-est. Le périmètre du projet se situe dans une configuration typique des limites d'agglomérations éclairées, où l'ambiance lumineuse est encore bien présente avec une obscurité dégradée.
- Le projet s'inscrit dans une obscurité mais reste dégradée mais qui s'améliore en direction du nord-est, en s'éloignant du halo lumineux global de Vannes.

Enjeux :

Les enjeux écologiques:

- Le périmètre s'inscrit dans un site avec une naturalité certaine. On retrouve plusieurs espèces qui peuvent présenter une sensibilité à la pollution lumineuse. Les enjeux sur les espèces s'orientent en priorité sur les chauves-souris, les oiseaux et les amphibiens. Pour les insectes, aucune investigation n'a été menée de nuit, mais la diversité des insectes de jour peut impliquer une bonne diversité des nuits. Un enjeu fort est aussi retenu.
- Pour les autres espèces, les enjeux restent plus modérés.
- Concernant la cohérence des écosystèmes, plusieurs éléments de la trame verte et bleue sont présents à proximité. D'un point de vue de la trame noire, ceux-ci peuvent représenter un enjeu modéré.

Enjeux humains :

Les premiers bâtiments se situent à moins de 100 mètres du projet, avec une population d'environ 80 habitants. Ces habitations représentent un enjeu de diffusion de lumière directe. Les autres habitations restent relativement éloignées (plus de 100 mètres) pour représenter un enjeu.

La scénarisation de la pollution lumineuse 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 projet sur l'environnement nocturne.

L'étude se déroule donc en deux temps :

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

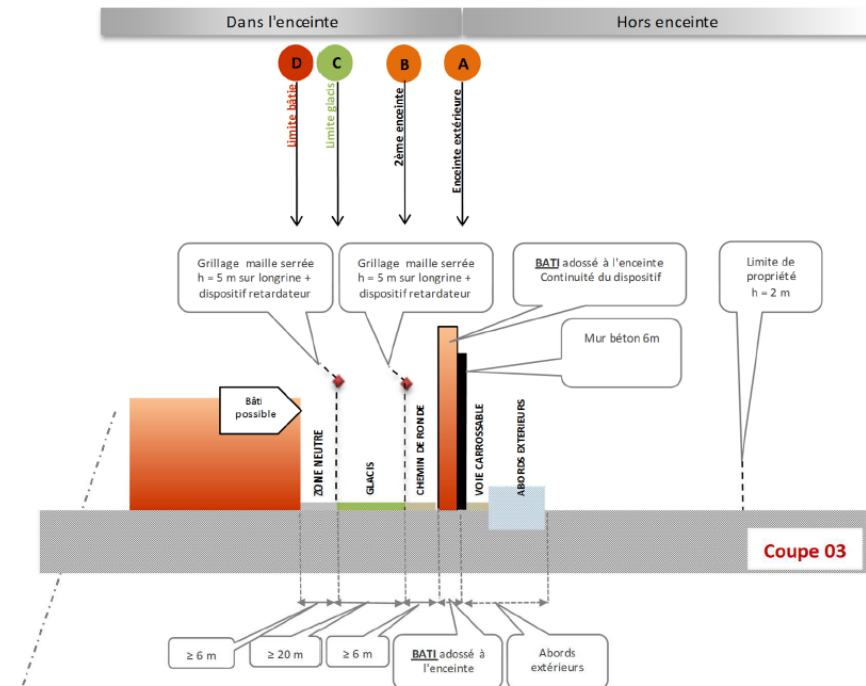
Pour l'étude de Vannes, le scénario proposé à l'étude correspond au Scénario 1 V1. Dans celui-ci, le projet correspond à un établissement pénitentiaire de 550 places. Ce projet comprend :

- Une voie d'accès ;
- Des annexes hors enceinte (locaux du personnel, parkings) ;
- Un espace en enceinte de 8,6 ha.

Méthode de scénarisation :

Pour scénariser la pollution lumineuse en enceinte, 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 ;
- Surfaces 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 et la répartition des périmètres. Ces exigences sont limitées à la définition d'un éclairage moyen ainsi qu'un coefficient d'uniformité. Ce coefficient (d) est le rapport entre l'éclairage minimum (E_{min}) et l'éclairage moyen (E_{moy}) :

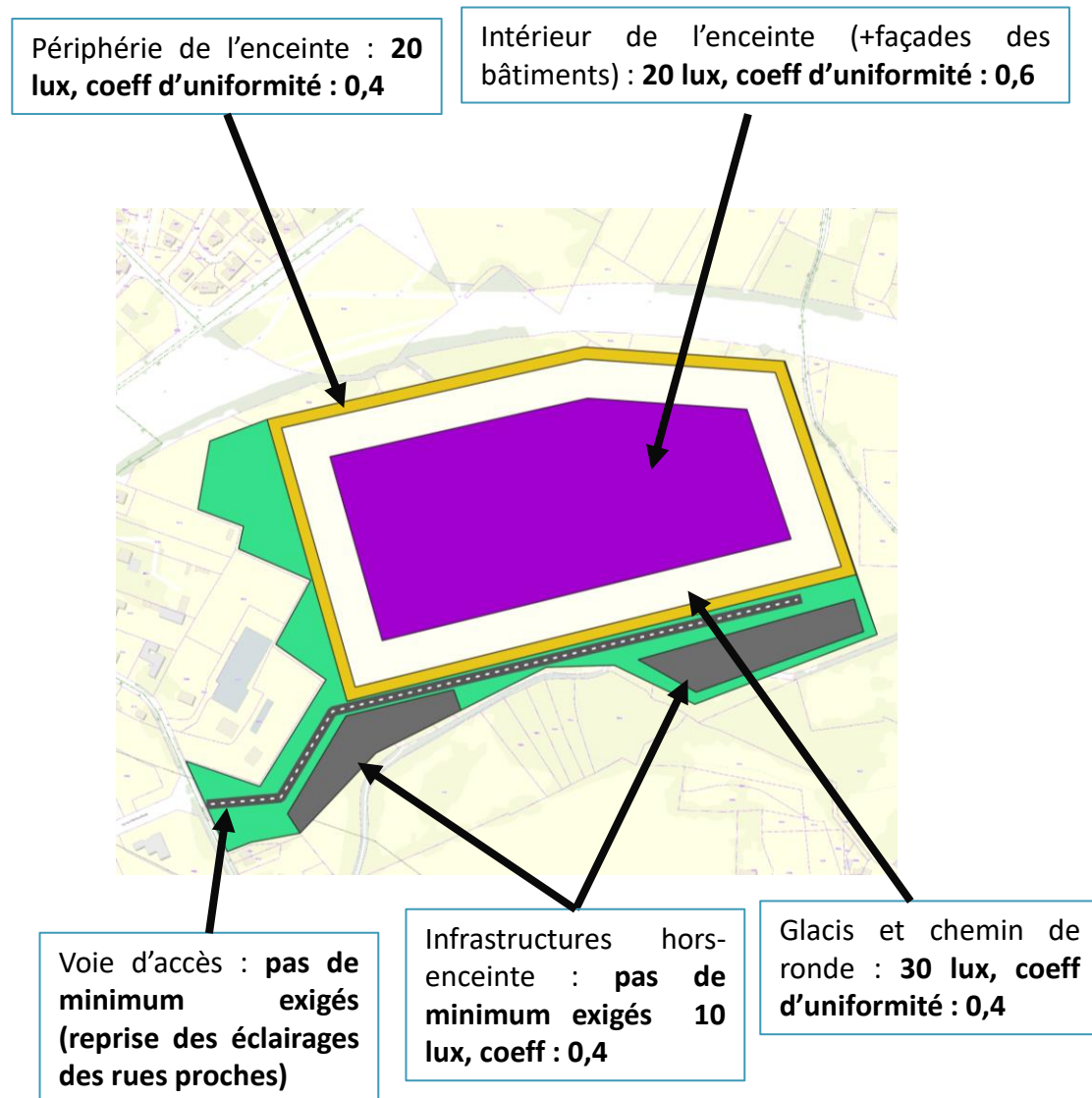
$$d = \frac{E_{min}}{E_{moy}}$$

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

Pour la zone hors-enceinte, celle-ci pourra potentiellement accueillir des parkings et bâtiments divers qui ne sont pas soumis à des exigences particulières. Pour la modélisation de cette particularité, des éclairages typiques de parkings ont été intégrés au modèle (soit un éclairage moyen de 10 lux).

Les voies d'accès ne sont pas non plus soumises à des exigences réglementaires au regard de projets pénitentiaires. Dans ce sens, nous reprenons les principes routiers, en intégrant un éclairage similaire à la rue du Rohic.

Les exigences réglementaires traduites 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 ;
- 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 :

- **Voie d'accès** : des éclairages identiques à la rue du Rohic, c'est-à-dire des lampadaires de 6 mètres de hauteur, avec une puissance modérée (40 W).
- **Enceintes annexes** : sans vraiment connaître leur fonction (bâtiments, parkings), 17 éclairages types « parking » ont été appliqués : hauteur 8 mètres et puissance modérée (65W).

- Bâtiment : 1 luminaire tous les 8 mètres, positionnés à 4 mètres de hauteur. Une puissance modérée a été appliquée (LED 50W).
- Mur d'enceinte : 1 luminaire tous les 16 mètres, hauteur de 6 mètres et une puissance modérée (LED 40 W).

Dans cette simulation, tous les éclairages sont considérés comme respectant l'arrêté. Ainsi aucun flux émettant en direction du ciel n'a été impliqué.

Interprétation :

L'éclairage du projet est une simulation interprétée à partir des données réglementaires et de points lumineux intégrés au simulateur. Pour comprendre les effets de la pollution lumineuse, il est nécessaire de comprendre que la diffusion de l'éclairage peut aller au-delà des limites du périmètre.

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.**

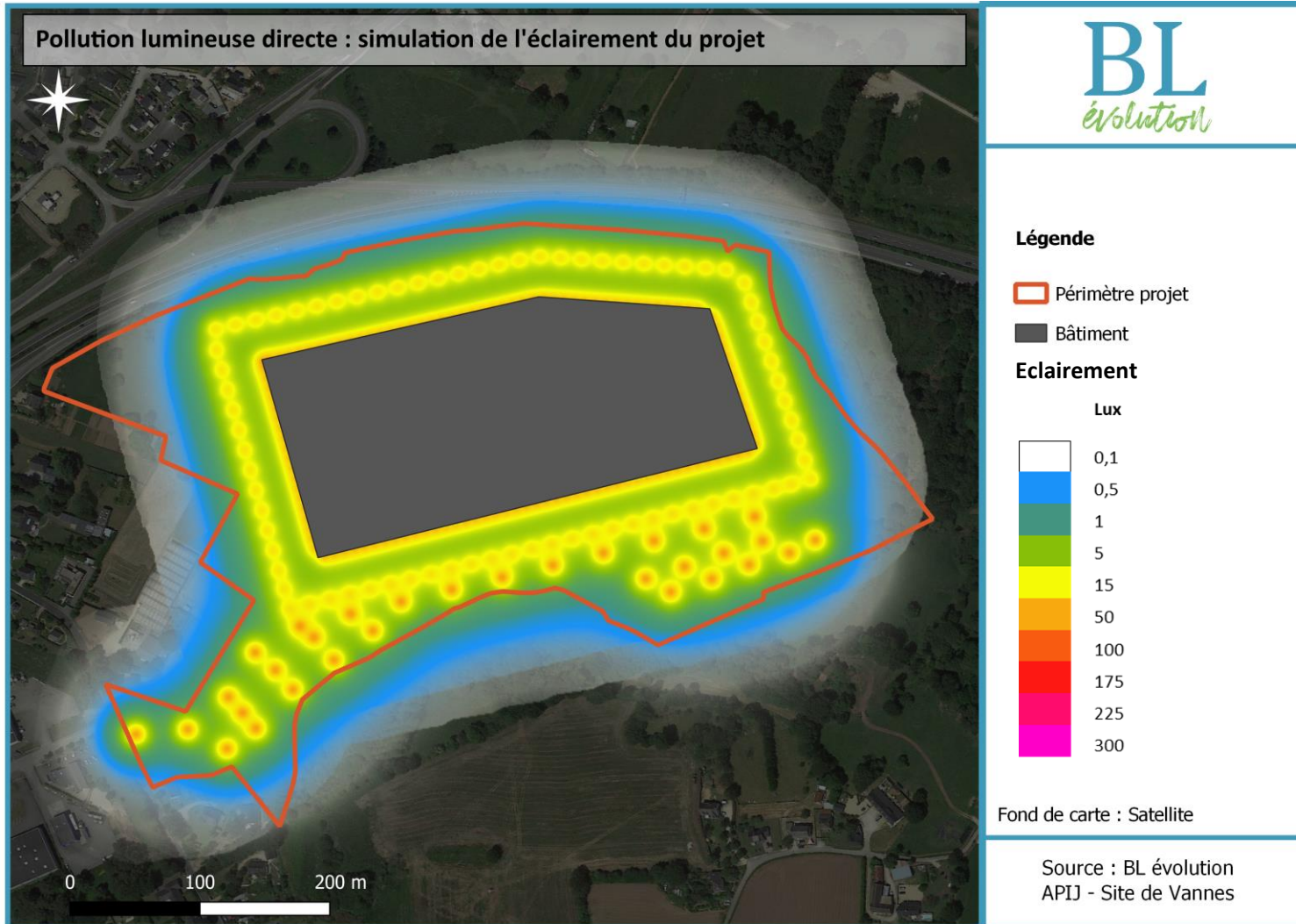
A noter que les flux lumineux peuvent être obstrués par des éléments (reliefs, arbres, haies). Cette potentielle obstruction ne peut pas être prise en compte dans cette étude, car il faudrait connaître des informations très précises comme la localisation de chaque arbre, la densité de chaque feuillage...

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 au sud du périmètre, avec la présence de la voie d'accès et des zones annexes.

À l'intérieur de l'enceinte, l'éclairage peut atteindre jusqu'à 65 lux. Sur les zones périphériques, l'éclairage atteint jusqu'à 25 lux.

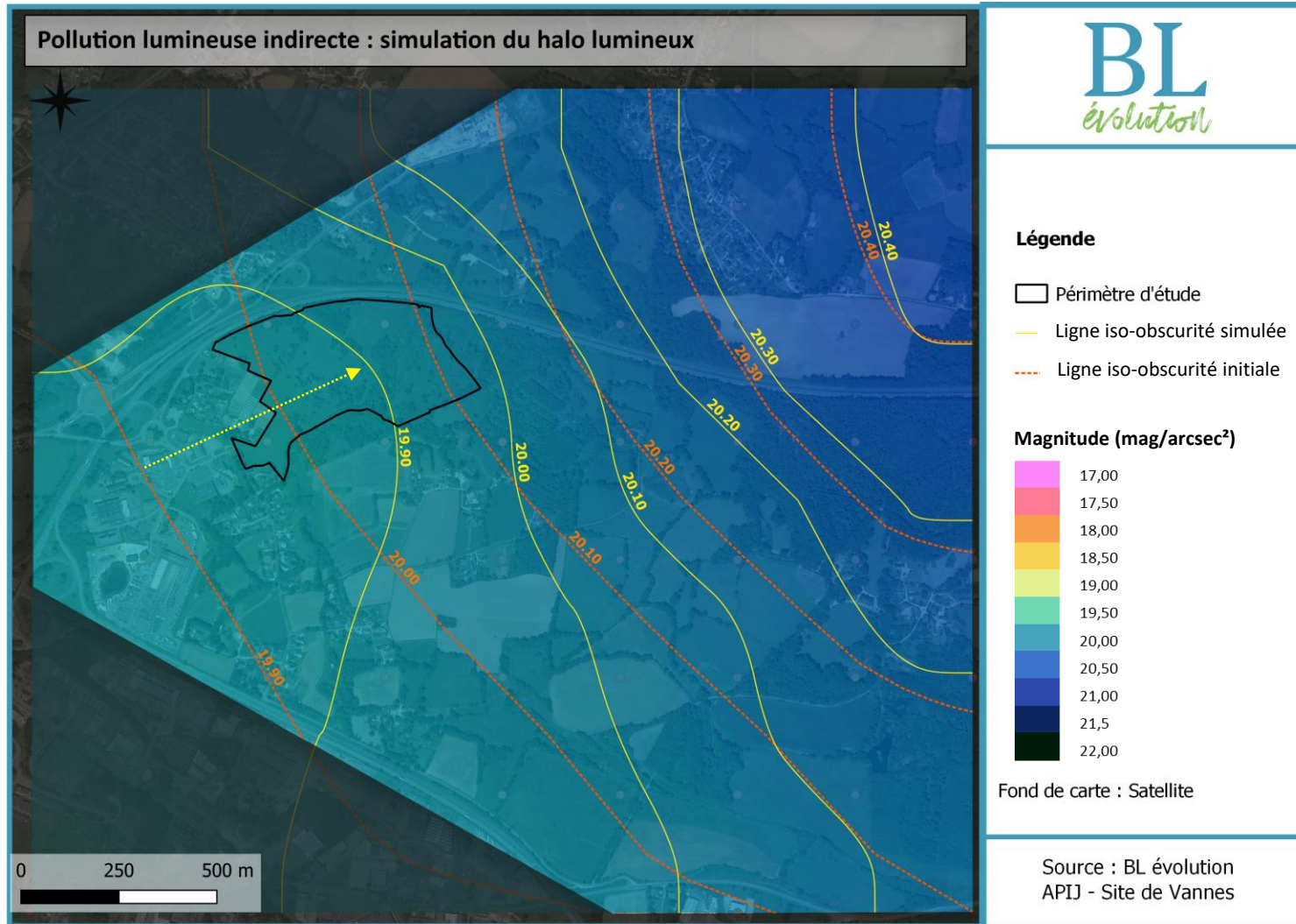
Au-delà, la quantité de flux lumineux régresse en fonction de la distance des points lumineux imaginés.

La surface réceptrice d'un éclairage peut s'étendre jusqu'à 85 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 ajoutée aux conditions initiales, 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 potentiel 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'éclairement en magnitude montrent une influence au niveau du périmètre du projet et des espaces proches.

L'influence la plus importante est concentrée au sud-ouest du projet, avec une magnitude qui atteint 19,85 mag/arcsec² par rapport à 20,00 mesurée à l'état initial.

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

Globalement, l'influence du nouveau projet va amener une magnitude de 19,90 mesurée initialement au sud-ouest, proche de la ZA de Chapeau rouge, à s'étendre en direction du nord-est, et altérant de manière modérée la qualité de l'obscurité du ciel à proximité du site.

L'altération de la qualité de l'obscurité du ciel reste relative par rapport à un état initial déjà dégradé.

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, 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 au sud du périmètre et en périphérie proche de l'enceinte bâtie.
- La simulation implique aussi la présence d'éclairages sur les parties extérieures des périmètres des enceintes. Ainsi ces éclairages peuvent avoir une influence jusqu'à 85 mètres au-delà du périmètre, pouvant atteindre certains espaces naturels et les habitations potentielles proches.

Pollution lumineuse indirecte :

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

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

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

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

La flore :

Les effets de la pollution lumineuse sont 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.).

Enjeux à l'état initial :

Les analyses floristiques ont été étudiées sous le prisme des zones humides. Plusieurs espèces indicatrices des milieux humides sont présentes, mais aucune ne sont inscrites sur la liste rouge ou sont protégées.

Impacts du projet après simulations

Les principaux impacts s'orienteraient sur la pollution lumineuse directe. L'ensemble des zones humides seront susceptibles de recevoir un flux lumineux direct. Néanmoins, du point de vue floristique cela reste peu impactant.

- Impacts peu significatifs.

Les invertébrés :

La pollution lumineuse a un impact extrêmement fort sur les invertébrés, et notamment les espèces volantes. Ce sont notamment les lumières émettant dans des gammes d'ultra-violet et courtes longueur d'onde (bleu) qui ont le plus d'impacts sur les insectes. La réaction principale est une phototaxie positive marquée, c'est-à-dire que les espèces sont fortement attirées par la lumière. De plus, les insectes nocturnes représentent un maillon très important de la chaîne alimentaire d'un écosystème, ce qui implique de nombreux enjeux en cascades pour toutes les espèces.

La pollution lumineuse a pour effet :

- Désorientation et fatigue :
 - Les invertébrés nocturnes sont directement attirés par les flux lumineux (réflexe de phototactisme).
- Pièges et mortalités :
 - L'attraction réflexe vers la lumière piège les espèces sous les flux lumineux. Les espèces se retrouvent piégées dans les vasques des lampadaires augmentant la mortalité directe.
- Barrières écologiques :
 - 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.

Enjeux à l'état initial :

Les milieux présents peuvent se montrer favorables, impliquant une diversité d'espèces importantes notamment pour les papillons. Pour l'ensemble des espèces étudiées (Rhopalocères, Orthoptères et Autres invertébrés), il y a peu d'espèces protégées identifiées avec une préoccupation mineure (à l'exception de l'Azuré de la Bugrane qui est identifié comme « quasi menacée »). Le Grand capricorne, qui est protégé, est présent.

A noter qu'aucune investigation sur les espèces nocturnes n'a été réalisée. Néanmoins, vu la diversité des espèces diurnes présentes, et les habitats favorables (notamment pour les papillons), cela laisse penser une potentielle présence de papillons nocturnes (hétérocères).

Impacts du projet après simulations

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

Les zones éclairées pourront devenir un piège, impliquant une surmortalité directe sur les ampoules et indirecte, par un déséquilibre de la prédation.

Il s'agit d'un enjeu important et qui reste difficile d'éviter ou réduire. Aucune liste rouge n'est émise sur les hétérocères.

■ Impacts :

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

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 (ex : crapauds).
- Modification des comportements :
 - Les amphibiens et plus précisément les grenouilles et crapauds mâles ont tendance à réduire l'intensité des chants, voire de les stopper en cas d'éclairage direct. La reproduction est moins sélective.
- Altération des déplacements :
 - Les migrations des espèces d'amphibiens se font essentiellement la nuit, en présence d'éclairage les déplacements sont perturbés, voire supprimés.
- Activités d'alimentation :
 - Certaines espèces 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.

Enjeux à l'état initial

Des milieux aquatiques temporaires (à sec en juillet et septembre) ont été localisés. Plusieurs zones humides sont présentes au sein du périmètre d'étude.

Un cours d'eau intermittent est présent à la limite sud du projet et une mare, accueillant des amphibiens, à la limite sud-est du projet.

Quatre espèces communes ont été observées sur le périmètre, dont certaines connaissent une sensibilité importante à la lumière.

Impacts du projet après simulations

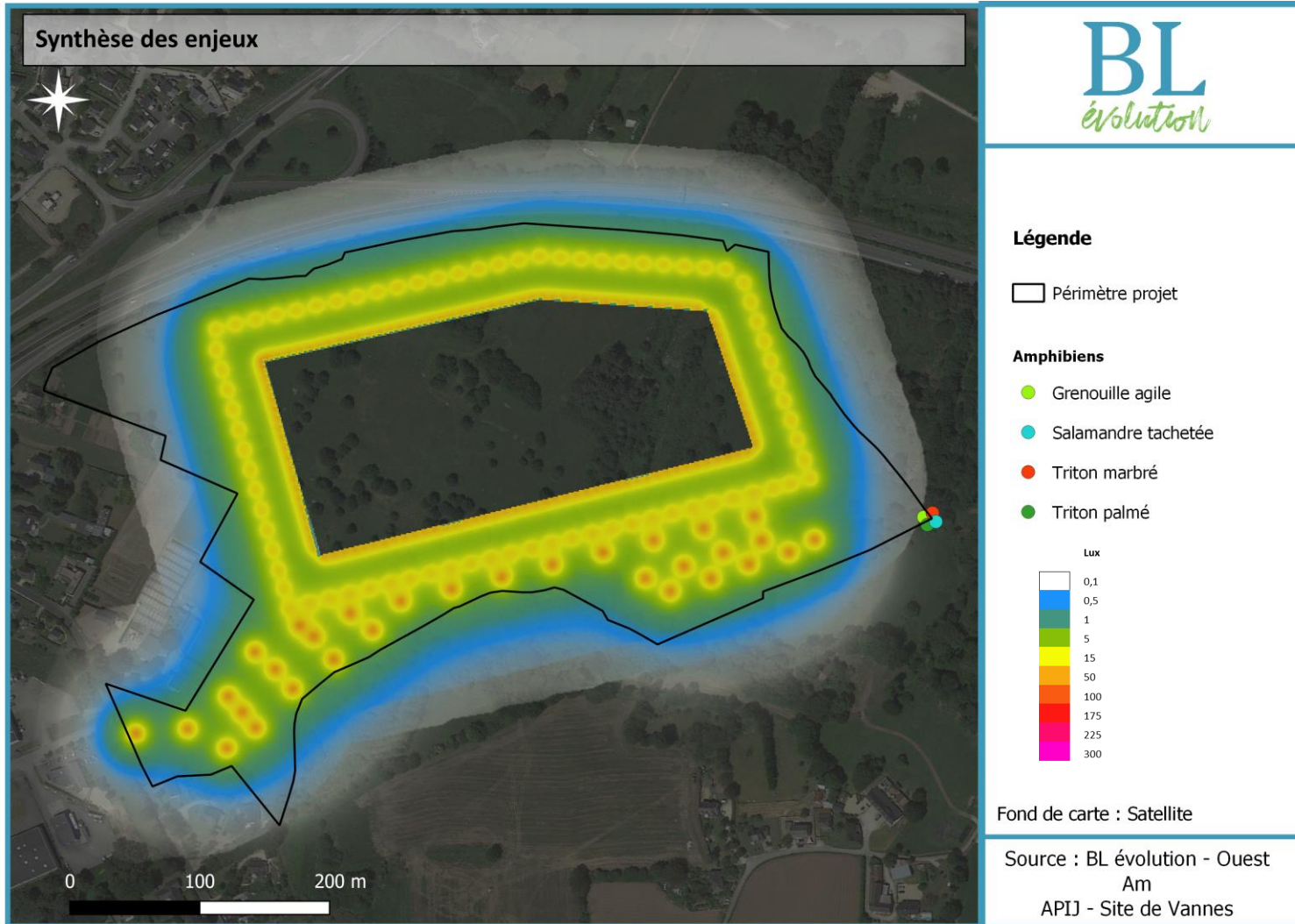
Les enjeux s'orientent sur les impacts de la pollution lumineuse directe.

Les éclairages directs vont atteindre les zones humides au nord et au sud du territoire. Les éclairages les plus au sud (voie d'accès et bâtiments annexes) vont impliquer un éclairage relatif (1,5 lux) sur le cours d'eau identifié au sud du périmètre. La mare se situe à la limite de l'éclairage simulé.

Ces éclairages pourront altérer le fonctionnement biologique d'espèces et impacter une potentielle migration qui pourrait se faire entre ces espaces en fonction des saisons.

Impacts :

- **Dérangements et atteintes des cycles biologiques : réduction et altération de la reproduction dans les zones humides.**
- **Barrière écologique : difficulté de migration (notamment saisonnière) rupture écologique au niveau du cours d'eau intermittent hors périmètre.**



Amphibiens :

Les amphibiens ont été identifiés à l'est du périmètre d'étude, avec un habitat représenté par la présence d'une mare.

Cet espace se situe à l'est du projet. Ainsi les éclairages directs, selon la modélisation proposée, ne devrait pas recevoir de flux trop intense direct. Néanmoins, un éclairage même très faible peut impacter la vie des amphibiens.

De plus, la lumière joue un rôle important de fragmentation de la cohérence écologique pouvant repousser les possibles espèces qui pourrait migrer.

Ainsi, l'impact retenu se montre modéré et les mesures d'évitement et de réduction vont permettre de limiter les impacts.

Reptiles

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

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

Les réponses connues pour les reptiles (hors tortues) :

- Fonction biologique :
 - La lumière peut être dérangeante pour les phases d'hibernage, impliquant que les espèces s'éloignent des zones éclairées.
- Altération des déplacements :
 - La lumière est soupçonnée d'être un élément fragmentant des migrations journalières qui peuvent avoir lieu au crépuscule.

Enjeux à l'état initial

Trois espèces ont été recensées durant les investigations, plus une probabilité de présence de la couleuvre helvétique. La vipère péliade est classé vulnérable et en danger sur la Bretagne.

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

Impacts du projet après simulations

- 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).

Enjeux à l'état initial

Diversité assez forte, la plupart sont des espèces communes et non menacées. Il y a 14 espèces, sur les 49 recensées, qui figurent sur la liste des espèces menacées (6 espèces vulnérables et 8 espèces quasi-menacées).

De plus, le territoire accueille plusieurs rapaces nocturnes (Chouette hulotte, Effraie des clochers : préoccupation mineure). On notera aussi la présence d'oiseaux migrateurs qui voyagent essentiellement de nuit et qui sont impactés par la pollution lumineuse directe et indirecte.

Impacts du projet après simulations

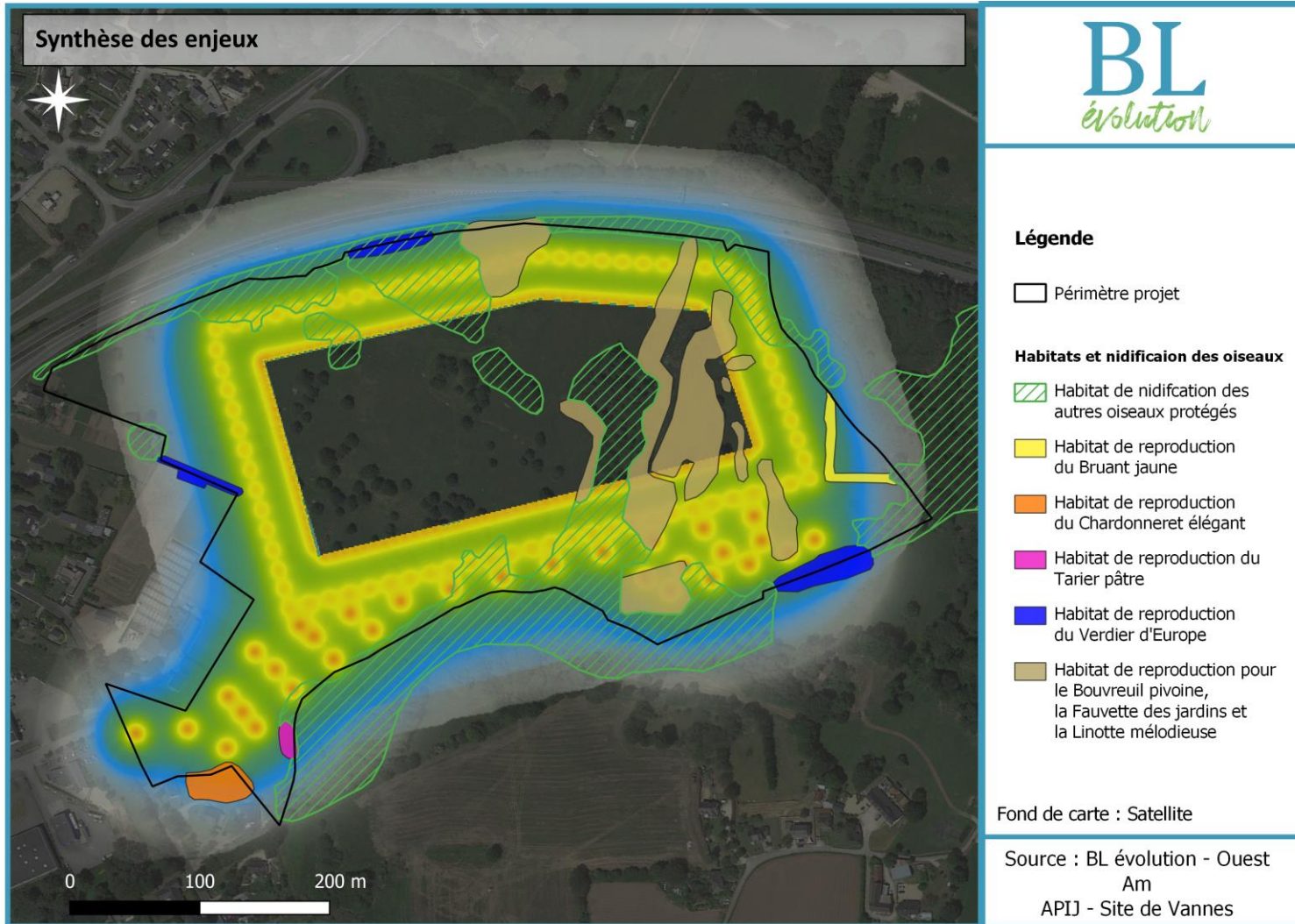
Ici, les enjeux s'orientent sur la pollution lumineuse directe et indirecte.

Pollution lumineuse directe : la nidification pourra être impactée, avec une réponse d'un déplacement des nids qui peuvent potentiellement être directement éclairés. Cela va notamment concerner les zones de haies et arbustives à proximité du projet, au nord, à l'est et au sud. Les rapaces nocturnes peuvent potentiellement fuir la zone éclairée.

Pollution lumineuse indirecte : la modification qui est attendue sur la qualité du ciel nocturne reste relative par rapport à l'état initial et au halo lumineux de la ville de Vannes.

▪ Impacts :

- **Niches** : recul des zones de nichage des oiseaux diurnes.
- **Rapaces nocturnes** : fuites des espèces.
- **Barrière écologique** : migration difficile/rallongée/retardée.

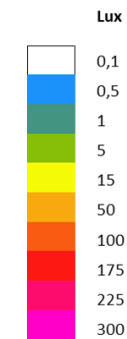


Avifaune :

Concernant l'avifaune, la mise en lumière directe des espaces de nidification peut avoir un impact et limiter la présence de nids.

Concernant la pollution lumineuse prédite du projet, celui-ci va mettre en lumière l'ensemble des espaces identifiés par l'étude écologique pour leur fonction d'habitats ou de nidification.

Cela aura pour conséquence, un recul possible de la nidification vers des espaces éloignés de toute lumière directe. Un impact qui pourra avoir des conséquences importantes, notamment dans un contexte de diffusion importante des flux au-delà des espaces bâtis.



Mammifères (hors chiroptères)

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

Les effets de la pollution lumineuse ont pour conséquence :

- Barrière écologique :
 - La lumière agit comme barrière écologique et limite la cohérence des écosystèmes (suppression des corridors écologiques), les espèces ne peuvent plus se déplacer et migrer.
- Baisse de l'activité de nutrition :
 - Les mammifères (petits et micromammifères notamment) montrent une activité particulièrement réduite sous les flux lumineux proches et dans des zones avec des halos lumineux intenses.
- Confinement dans des espaces sans lumières :
 - La fuite de la lumière entraîne un confinement des espèces dans des espaces de plus en plus restreints entraînant surpopulation (et soupçonnent même des problèmes génétiques).
- Sur-prédation :
 - En présence de lumière de nombreuses espèces se trouvent exposées à la prédation, ainsi que le confinement pousse les espèces opportunistes à ne chasser qu'en présence de lumière (exemple des phoques veaux-marins agglutinés sous les plages éclairées pour attraper les saumons juvéniles attirés par la lumière).

Enjeux à l'état initial

Le projet présente essentiellement des espèces communes, dont le lapin de garenne (identifié comme quasi menacée).

Les espèces présentes sont essentiellement diurnes et communes. Le blaireau et certains mulots ont une période de vie qui se déroule en partie la nuit.

Impacts du projet après simulations

Ce sont les éclairages directs qui pourraient être plus impactants pour ces mammifères.

Le principal impact concerne la formation d'une barrière écologique de la trame nocturne par le projet. On notera notamment un éclairage qui pourrait survenir sur le corridor grande faune situé au sud-est du périmètre. Le site se trouvant dans des conditions d'obscurité déjà dégradées, la perturbation du halo lumineux ne devrait pas avoir une contrainte majeure sur les mammifères.

- **Impacts :**
 - **Barrière écologique : intrusion de lumière dans le corridor grande faune qui pourrait réduire la perméabilité des déplacements sur cette zone.**

Chiroptères

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

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

La pollution lumineuse a pour effet :

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

Enjeux à l'état initial

Le projet présente une diversité variable, avec la présence de 6 espèces dont quatre sont quasi-menacées (3 sur la liste rouge Bretagne (Pipistrelle nathusius, Barbastelle d'Europe, Noctule de Leisler) et 4 sur la liste rouge France (Pipistrelle commune, Pipistrelle nathusius, Sérotine commune, Noctule de Leisler). **Le territoire compte plusieurs zones de chasse identifiées.**

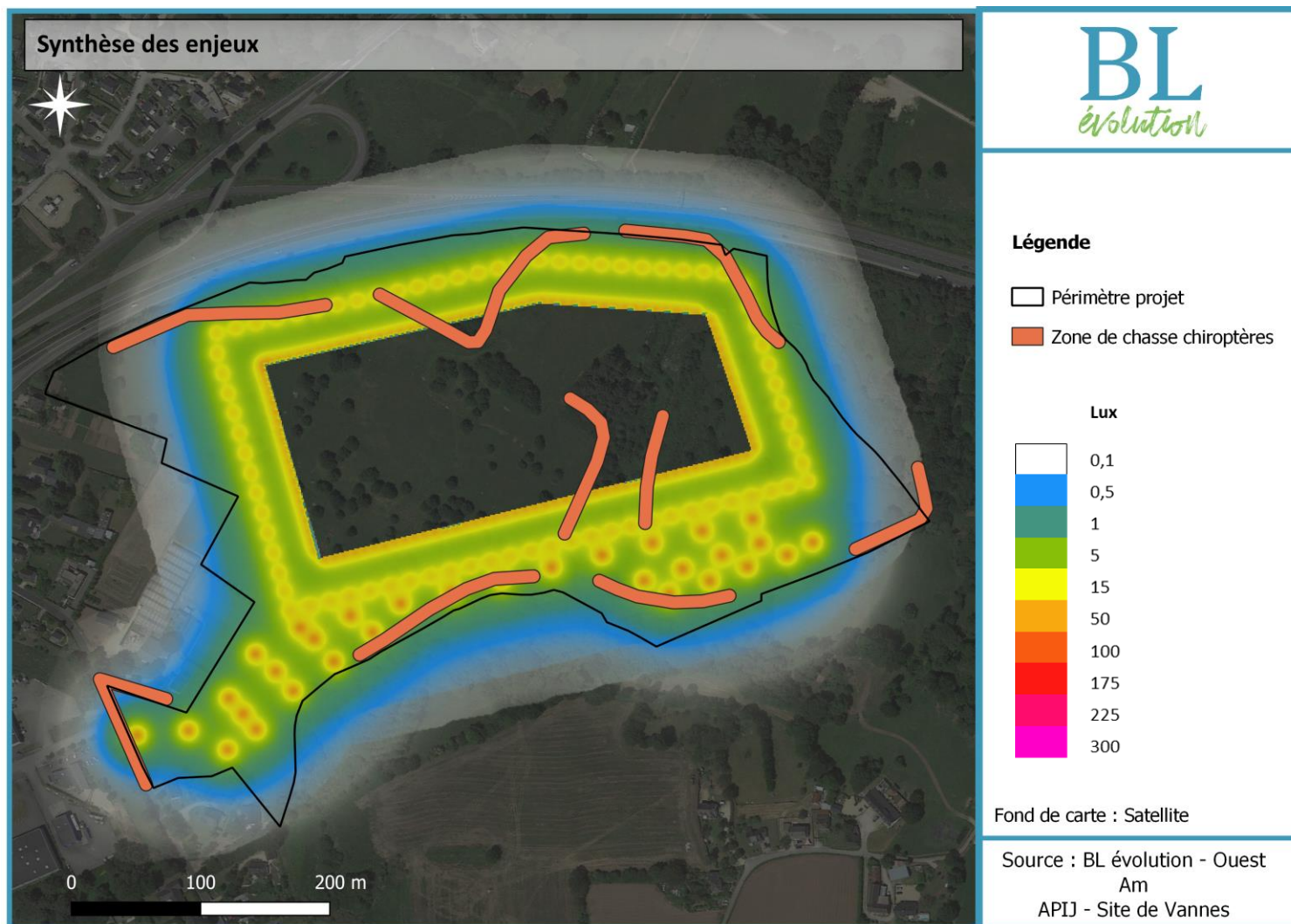
De nombreuses espèces de chiroptères sont lucifuges et vont donc fuir la lumière. Seules les pipistrelles communes semblent moins sensibles.

Impacts du projet après simulations

Une nouvelles fois, la pollution lumineuse directe semble être la principale source d'impact. La mise en lumière du projet va avoir plusieurs effets négatifs, avec la fuite des espèces les plus sensibles et la suppression des zones de chasse. Les espèces les moins sensibles peuvent potentiellement être présentes, et cela impliquera un possible déséquilibre de la relation proie/prédateur en lien avec les insectes sur ces espaces. La présence de lumière sera aussi un impact dans la migration des espèces, les obligeant à faire des détours pour aller d'une zone à une autre.

- **Impacts :**

- **Barrière écologique : limitation de la migration et obligation de détourner le projet.**
- **Fuite des espèces lucifuges.**
- **Déséquilibre du lien proie/prédateur avec les insectes.**



Chiroptères :

L'ensemble des zones de chasse identifiées par l'étude écologique vont se retrouver sous des éclairements directs plus ou moins intenses.

Cela aura pour effet de supprimer/altérer ces espaces de chasse :

- Les espèces à phototactisme positif, comme la barbastelle, vont fuir la zone là où les éclairements sont présents, même en faible quantité,
- Les espèces opportunistes, comme la pipistrelle commune, ont tendance à chasser sous la lumière. Les zones de chasse vont plutôt perturber à court terme les proies (insectes attirés sous les lampadaires), puis les populations de chiroptères à long terme.

La mise en lumière artificielle prolongée va altérer ces zones de chasse, avec une fuite des espèces lucifuges et un déséquilibre potentiel des espèces les plus opportunistes.

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.

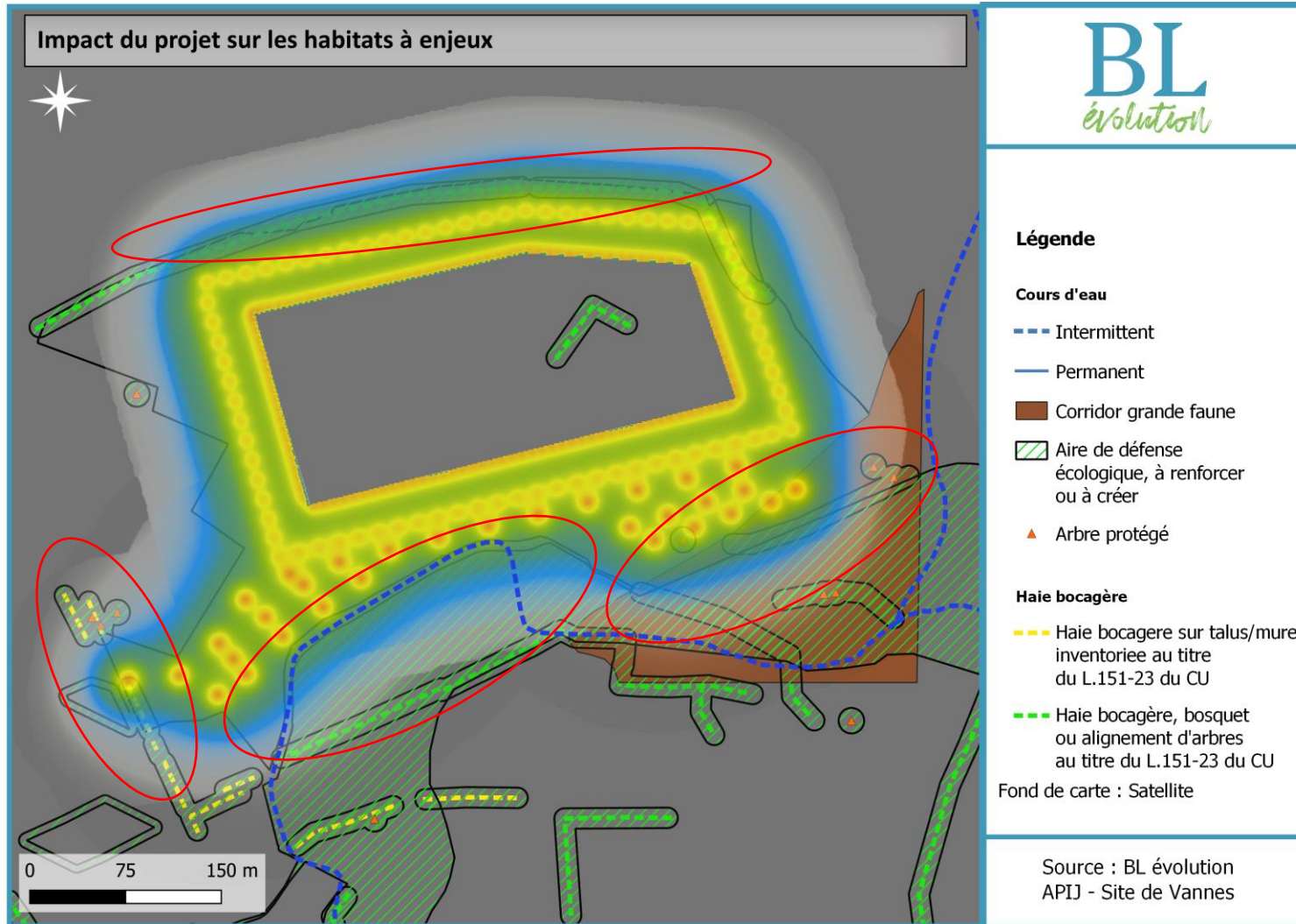
La TVB permet de définir :

- 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.

Etude d'impact sur les habitats à enjeux : pollution lumineuse directe



Cette carte permet d'étudier les enjeux de trame noire en superposant les résultats de la pollution lumineuse directe avec les habitats à enjeux identifiés sur et à proximité du périmètre du projet.

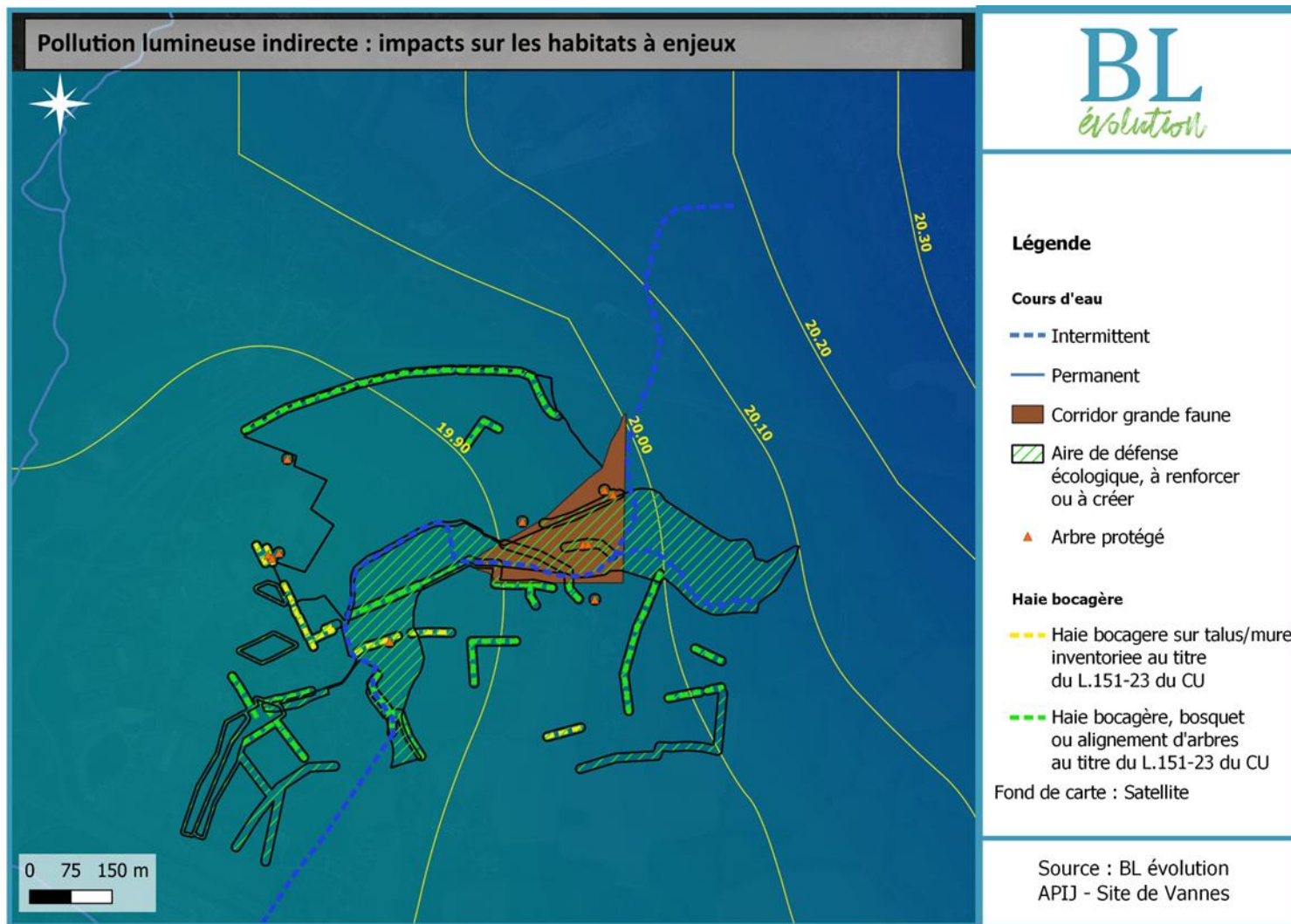
Les résultats montrent que les enjeux sur la cohérence des écosystèmes se situent en priorité au sud, avec la mise en lumière de corridors et du cours d'eau intermittent.

Au nord du périmètre, la haie subira aussi un potentiel éclairage au regard de la simulation.

Les éclairages sur ces différentes zones naturelles pourront impliquer une modification de la cohérence des écosystèmes au sein des habitats. Comme les haies, qui peuvent être des passages privilégiés pour les chiroptères par exemple. Cela peut être impactant à des très faibles niveaux d'éclairage.

Les autres éléments issus du SRCE, sont beaucoup trop éloignés pour être touchés par la lumière directe du projet.

Etude d'impact sur les habitats à enjeux : pollution lumineuse directe



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

On notera un impact plus marqué au sud-ouest. La modification de qualité de l'obscurité du ciel présente un impact assez peu marqué et moins important que la pollution lumineuse directe. Cela s'explique principalement par le fait que le projet s'installe dans un halo lumineux relativement intense à l'état initial.

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 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.

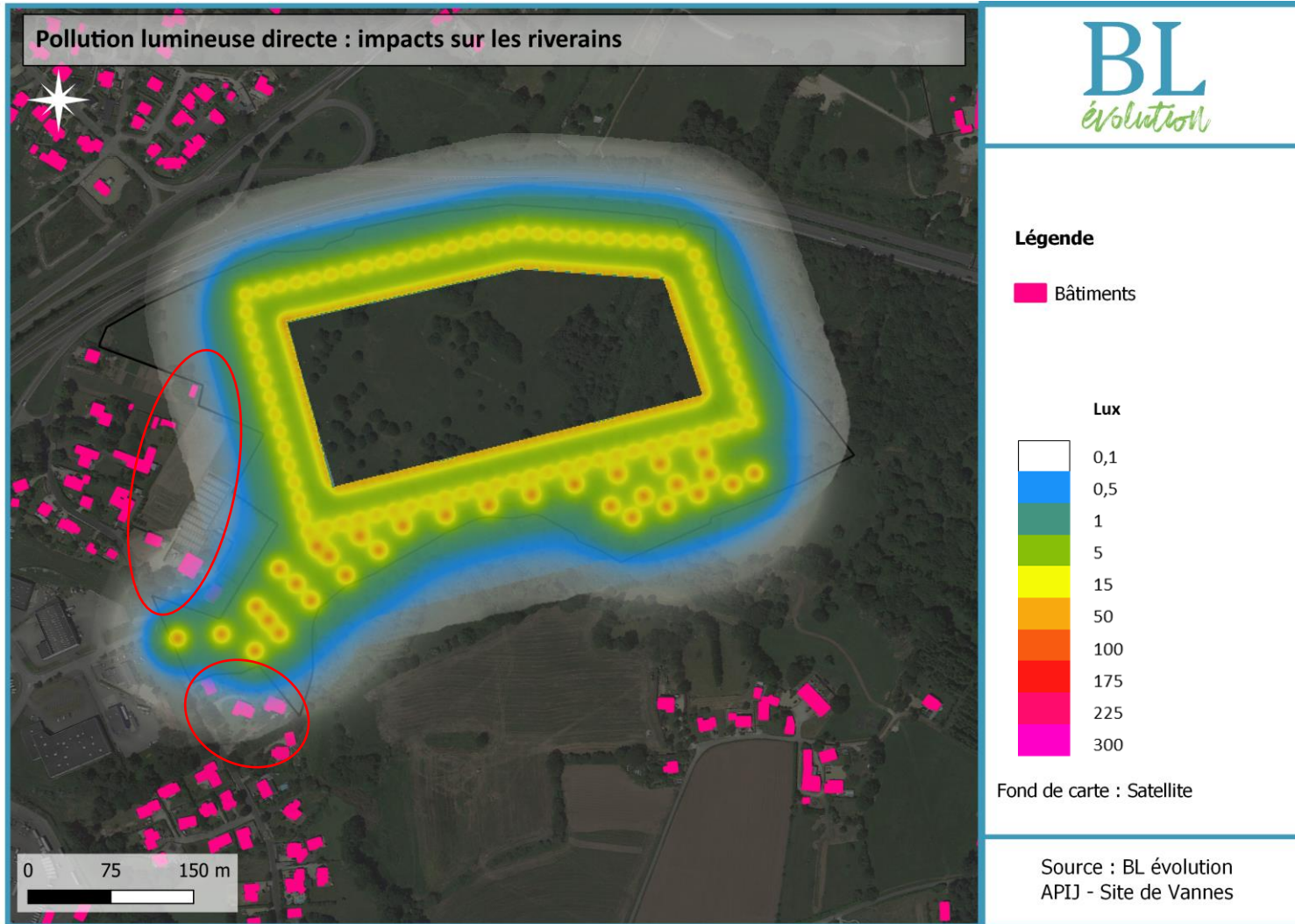
Cependant, elles s'accordent toutes sur le fait que la pollution lumineuse et notamment l'éclairage direct dans des tons bleus ont des effets néfastes sur la santé.

L'état initial avait permis de mettre en avant que des habitations sont présentes dans un rayon de 100 mètres du périmètre du projet (environ 80 habitants).

Pollution lumineuse directe

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

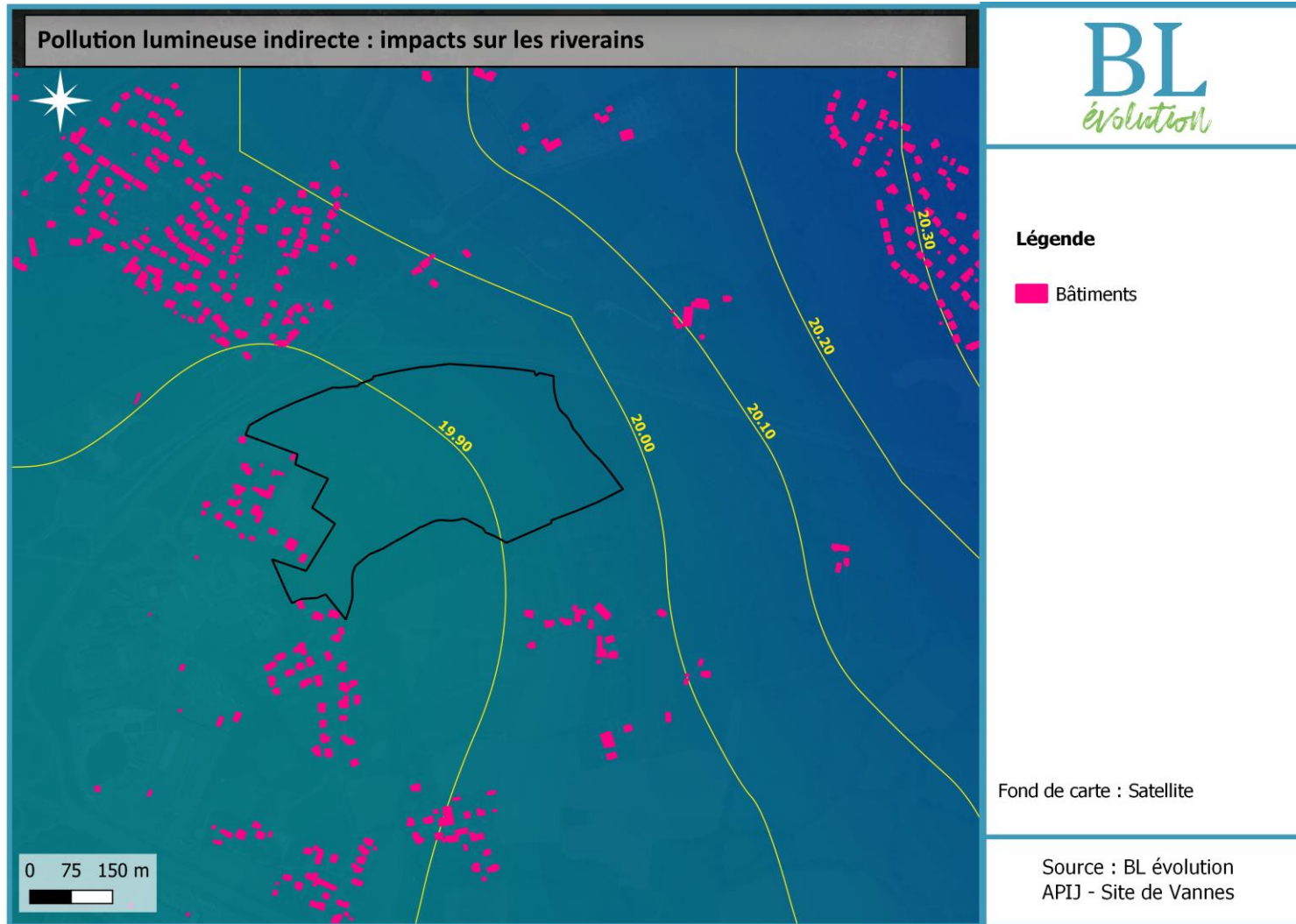
Néanmoins, la diffusion des éclairages les plus extérieurs peuvent avoir une influence au-delà de la limite propre du projet. Cependant, cette diffusion reste limitée à environ 85 mètres au-delà des sources d'éclairages. Seules les premières habitations les plus proches pourraient potentiellement être concernées.



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.

Selon les éclairages imaginés, l'impact sur les riverains reste limité. Les bâtiments potentiellement résidentiels à l'ouest pourront recevoir un éclairage compris entre 0,1 et 1 lux. Cela reste peu perceptible pour l'être humain.



En ce qui concerne la pollution lumineuse indirecte, 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 ne vont pas connaître de modifications importantes.

La qualité du ciel au zénith des habitations à l'ouest devraient être modifiée de manière très relative.

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.

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. L'analyse des impacts pour les détenus ne peut être caractérisé.

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.

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	Impacts hiérarchisés	Impacts du projet
Flore	Nul	<i>Impact nul</i>
Amphibiens	Modéré*	<ul style="list-style-type: none"> Dérangements et atteintes des cycles biologiques : réduction et altération de la reproduction dans les zones humides (si confirmées) Barrière écologique : difficulté de migration, rupture écologique au niveau du cours d'eau intermittent hors périmètre
Reptiles	Nul	<i>Non concernée</i>
Mammifères (hors chiroptères)	Faible	<ul style="list-style-type: none"> Barrière écologique : intrusion de lumière dans le corridor grande faune qui pourrait réduire la perméabilité des déplacements sur cette zone
Chiroptères	Fort	<ul style="list-style-type: none"> Barrière écologique : limitation de la migration et obligation de détourner le projet Fuite des espèces lucifuges Déséquilibre du lien proie/prédateur avec les insectes
Oiseaux	Fort	<ul style="list-style-type: none"> Niches : recul des zones de nichage des oiseaux diurnes Rapaces nocturnes : fuites des espèces Barrière écologique : migration difficile/rallongée/retardée
Odonate	Fort	<ul style="list-style-type: none"> Surmortalité : Attraction des insectes et modification des rapport proies/prédateurs Barrière écologique : difficulté de franchissement des zones éclairées
Rhopalocères		
Orthoptères		
Autres invertébrés		
Habitats et cohérence écologique	Modéré	<ul style="list-style-type: none"> Eclairage direct d'habitats Barrière écologique : rupture de cohérence écologique à proximité du périmètre
Riverains	Faible	<ul style="list-style-type: none"> Eclairage direct d'habitation à un niveau faible
Personnel et détenus	Nul	<i>Non caractérisable</i>

Conclusion des impacts des projets

Globalement le principal impact va concerner la cohérence écologique et la mise en lumière d'habitats ainsi que des espèces sensibles qui peuvent potentiellement fuir la zone stricte du périmètre.

La mise en lumière du projet pourra avoir des effets sur les éléments identifiés à enjeux, et notamment les haies bocagères situées de part et d'autres du périmètre. Cela pourra limiter leur fonctionnalité de cohérence écologique et leur rôle potentiel de corridor écologique, notamment pour l'avifaune et les chiroptères.

Concernant les insectes, nous disposons de peu de données sur la présence avérée d'espèces nocturnes. Néanmoins, la diversité des papillons de jour pourrait être révélateur de la présence de leurs homologues nocturnes.

On notera un enjeu limité pour la trame bleue et la cohérence au sein des rivières, notamment car le cours d'eau présent est identifié comme intermittent. Néanmoins, les zones humides (au nord et au sud du périmètre) pourront recevoir un éclairage certain.

Concernant les riverains, l'impact du projet reste faible. En effet, des bâtiments potentiellement résidentiels se situent dans un rayon de 100 mètres autour du projet, mais les éclairages auront une incidence jusqu'à 85 mètres. Seules les potentielles premières habitations recevront un éclairage, avec une intensité faible.

Le plus important est donc de travailler sur les éclairages les plus à l'extérieur du projet pour limiter les émissions au-delà du périmètre. Les principaux enjeux s'orientent sur les oiseaux, les chauves-souris et les insectes. Les amphibiens sont aussi à enjeu.

Les mesures correctrices

Limiter et réduire l'impact : mesures générales

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

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

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

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

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

Comme vu dans l'étude des impacts du projet, le point majeur pour l'étude de Vannes se concentre sur les enjeux d'éclairage d'habitats. Pour éviter et réduire au maximum les enjeux, il sera nécessaire de limiter au maximum l'immixtion de lumière en direction des habitats remarquables.

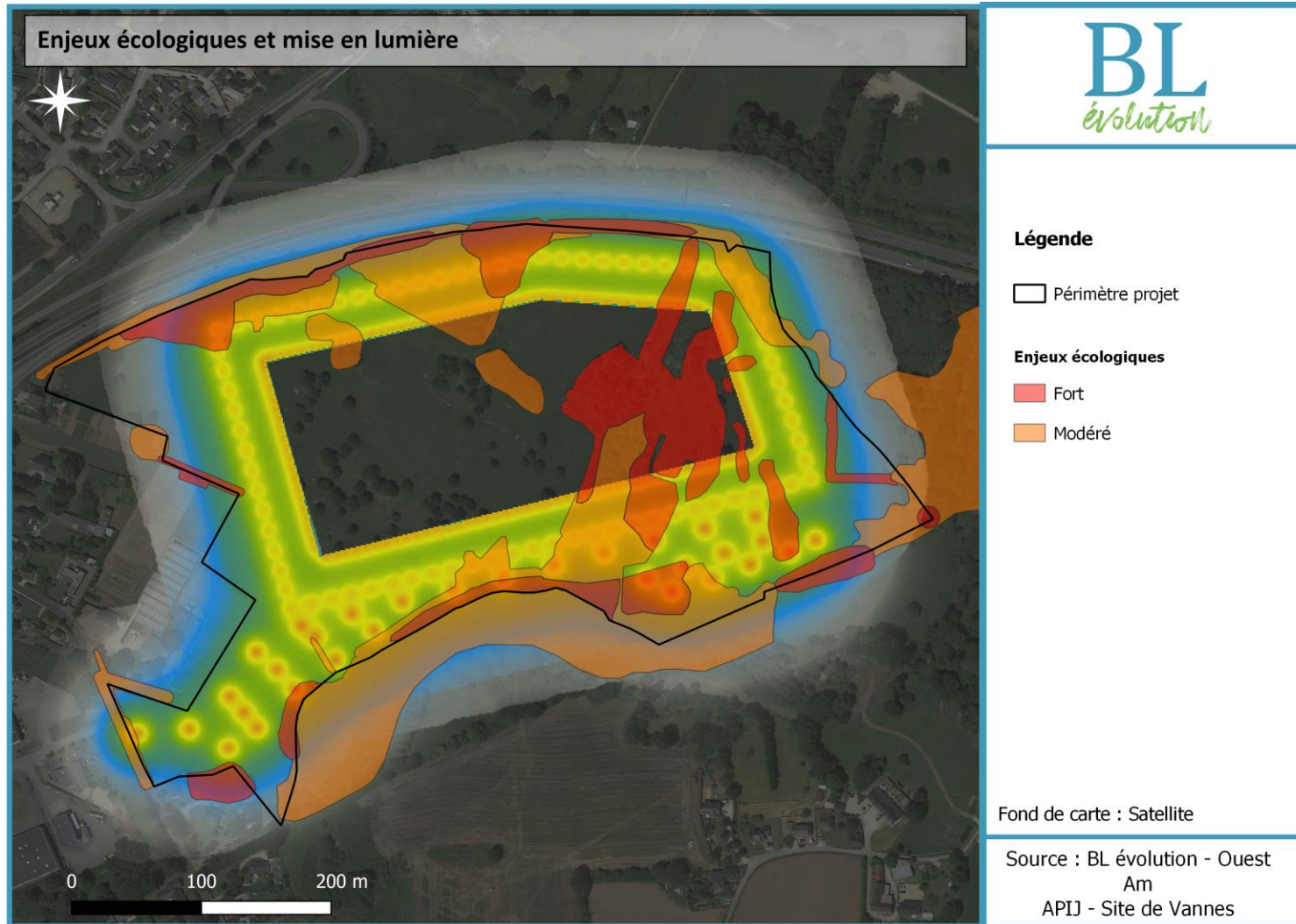
Pour cela des préconisations techniques sont nécessaires :

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

Limiter et réduire l'impact

Groupes étudiés	Mesure d'évitement	Mesures de réduction
FLORE	Limiter l'éclairage direct à l'intérieur de l'enceinte Limiter la densité de lumen par surface Utiliser des températures de couleurs inférieures ou égales à 2700K	
INVERTÉBRÉS	Utiliser un verre de protection Lampadaire avec un indice de protection (IP) supérieur à 65. Limiter l'éclairage direct à l'intérieur de l'enceinte Limiter la densité de lumen par surface	Limiter l'éclairage direct à l'intérieur du projet Utiliser des températures de couleurs inférieures ou égales à 2700K Créer des zones d'obscurité autour du projet (avec des haies)
AMPHIBIENS	Limiter l'éclairage direct à l'intérieur de l'enceinte Limiter la hauteur des éclairage inférieur ou égale à 4 mètres Ne pas éclairer les boisements au sud-est	Utiliser des températures de couleurs inférieures ou égales à 2700K Créer des zones d'obscurité autour du projet (avec des haies) pour éviter d'éclairer directement des zones humides
REPTILES	Éclairer en direction du sol (ULOR=0) Limiter l'éclairage direct à l'intérieur de l'enceinte Limiter la densité de lumen par surface	Utiliser des températures de couleurs inférieures ou égales à 2700K Créer des zones d'obscurité autour du projet (haie)
OISEAUX	Éclairer en direction du sol (ULOR=0) Limiter l'éclairage direct à l'intérieur de l'enceinte Limiter la densité de lumen par surface Limiter la hauteur des éclairage inférieur ou égale à 4 mètres	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 (avec des haies)
CHIROPTÈRES	Éclairer en direction du sol Limiter l'éclairage direct à l'intérieur de l'enceinte Limiter la densité de lumen par surface Eviter l'éclairage des lisières des zones de chasse et préserver les territoires de chasse	Utiliser des températures de couleurs inférieures ou égales à 2700K Créer des zones d'obscurité autour du projet (avec des haies) Mettre en place des nichoirs à chauve-souris dans des zones (non-éclairées) à proximité
MAMMIFÈRES	Éclairer en direction du sol Limiter l'éclairage direct à l'intérieur de l'enceinte Limiter la densité de lumen par surface	Créer des zones d'obscurité autour du projet (avec des haies)
COHÉRENCE DES ÉCOSYSTÈMES	Éclairer en direction du sol Limiter l'éclairage direct à l'intérieur de l'enceinte Limiter la hauteur des éclairages inférieure ou égale à 4 mètres	Créer des zones d'obscurité autour du projet (avec des haies)

Comparaison des enjeux écologiques et de la mise en lumière



L'étude écologique a permis de mettre en avant un zonage sur les enjeux classés de modérés à forts.

En considérant la pollution lumineuse comme une pression anthropique supplémentaire, cette carte montre que de nombreux espaces à enjeux vont recevoir un éclairage plus ou moins important.

Cela permet de mettre en avant le besoin de contenir au maximum les flux à l'intérieur de l'enceinte du projet et de protéger les espaces éloignés par des moyens d'obstruction de la diffusion de lumière. Ces moyens peuvent notamment se matérialiser par des haies, étagées et diversifiées, qui seront favorables à la biodiversité et pourront permettre de limiter l'éclairage des habitats.

Cela sera un levier important pour limiter l'impact du projet sur la pollution lumineuse et la biodiversité.

Pour conclure, l'étude de la pollution lumineuse pour le projet d'établissement pénitentiaire sur la commune de Vannes 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 avec une obscurité dégradée où le halo lumineux de l'agglomération de Vannes est encore bien présent et qui s'améliore en direction du nord-est. Le projet s'inscrit dans une zone avec un éclairage direct limité à deux rues proches (rue du Rohic et rue du Chapeau Rouge) et qui connaissent une extinction à minuit.

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, les insectes, les amphibiens et les chiroptères qui montrent des enjeux forts. Les enjeux de cohérences écologiques sont aussi importants par la présence de plusieurs habitats et éléments favorables (haies bocagères). A noter que les inventaires ont recensé plusieurs espèces sur liste rouge, mais avec des enjeux assez limités.

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 différents habitats 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 d'habitats naturels. Ce qui va représenter un enjeu pour les oiseaux, les insectes ou encore les chiroptères, mais aussi potentiellement pour les déplacements et la vie qui est liée aux milieux humides, comme les amphibiens. Ces enjeux peuvent être potentiellement importants dans des conditions d'éclairage direct.

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.

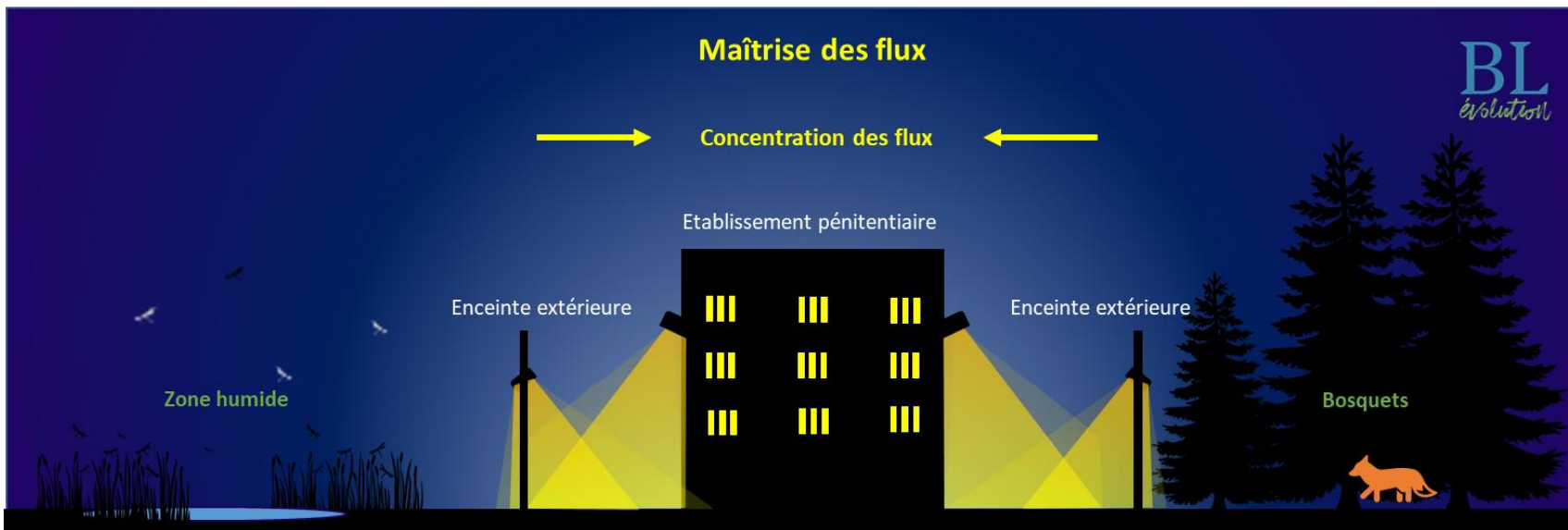
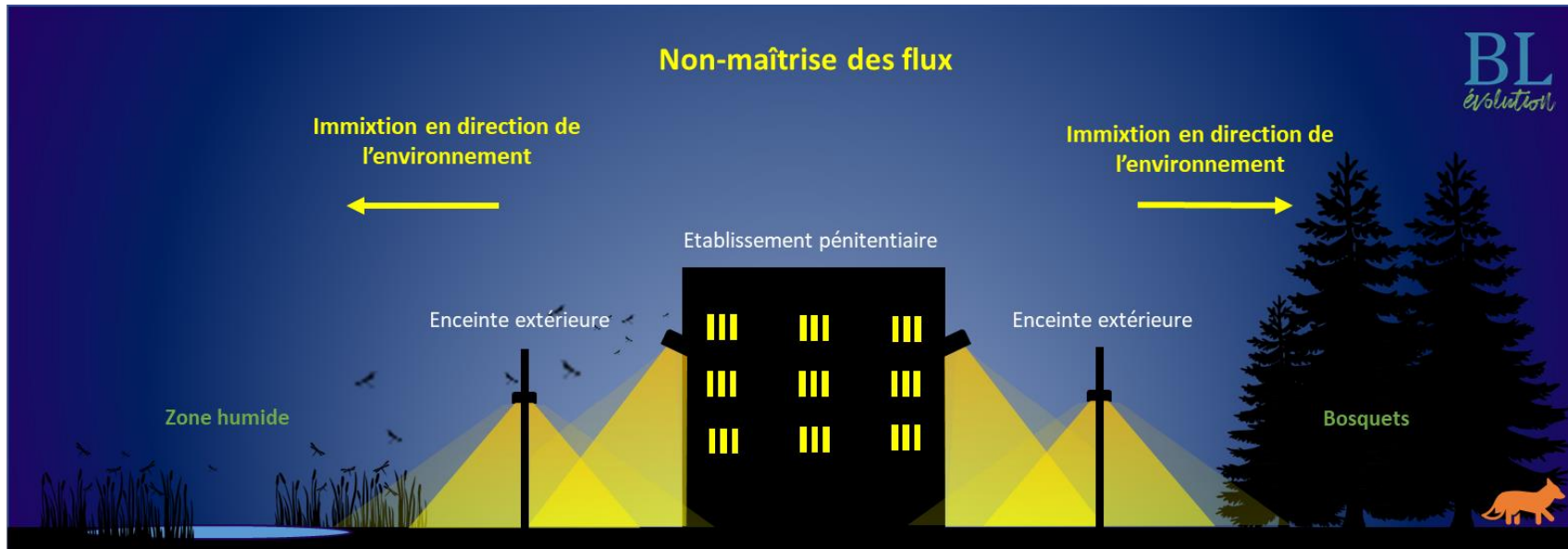
Ensuite un travail important est à mener sur les zones externes du projet pour éviter impérativement d'éclairer, même à très faible intensité, les espaces d'habitats naturels et de cohérence des écosystèmes.

Concernant les riverains, seules les premiers bâtiments accueillant potentiellement des riverains, recevront un éclairage direct. Cet éclairage reste relativement peu intense (< 1 lux). Les impacts seront faibles en terme de pollution lumineuse pour ces habitations.

Préconisations et recommandations

Maîtriser les flux lumineux

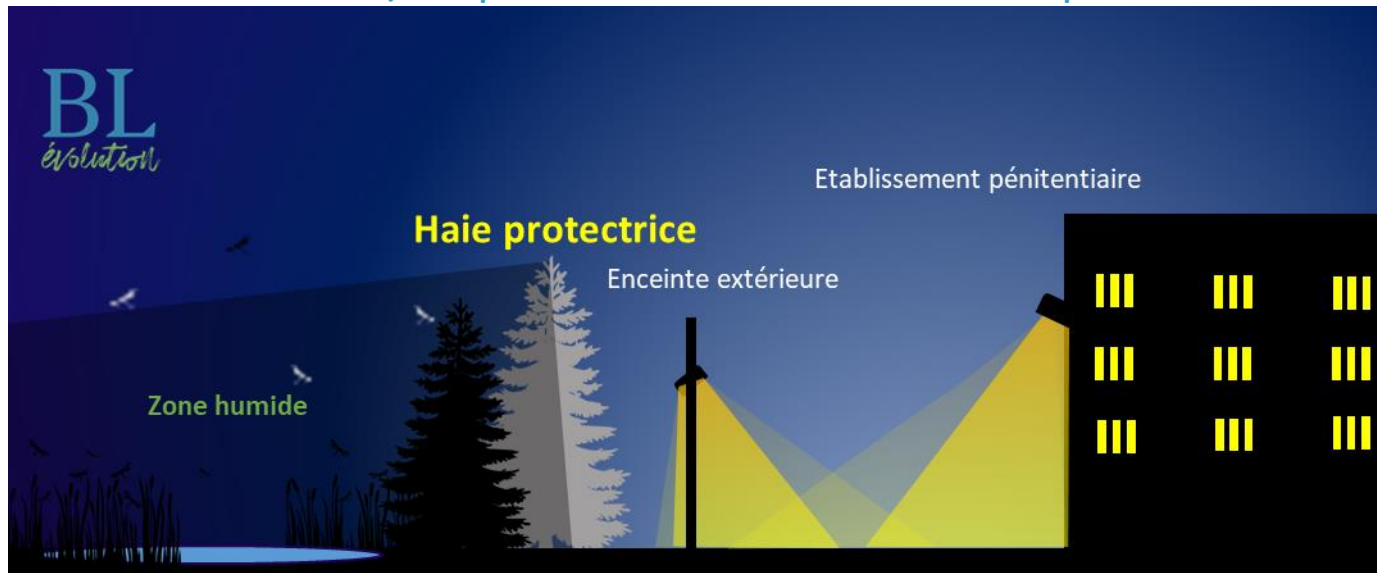
Eclairer uniquement à l'intérieur de l'enceinte



Eclairer en direction du sol

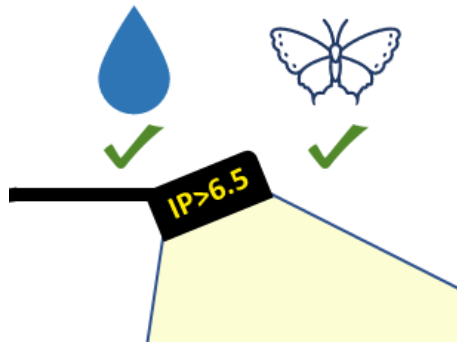


Planter des arbres/haies pour limiter l'immixtion de lumière hors du périmètre du site

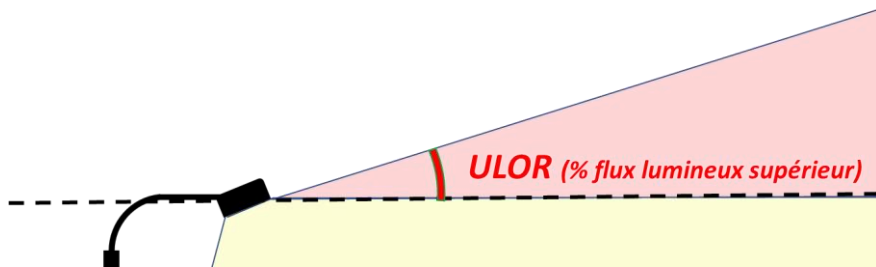


Préconisations techniques d'éclairage

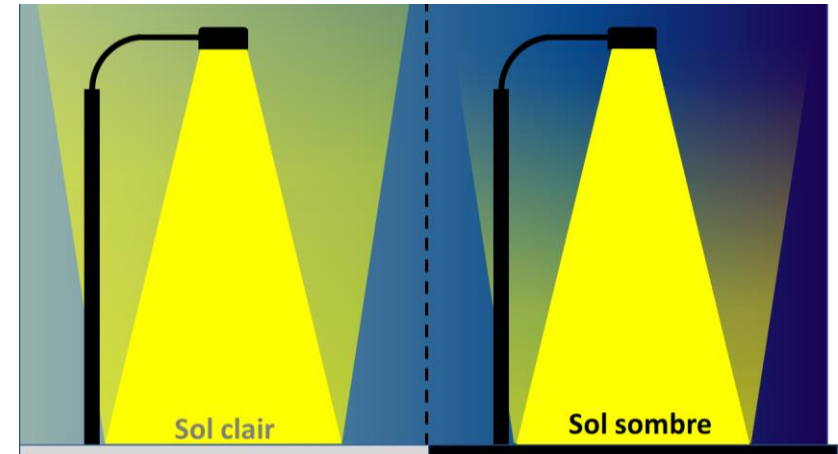
Utiliser un verre de protection lampadaire avec un indice de protection (IP) supérieur à 6.5 (résistant à l'infiltration d'eau, de poussières et donc d'insectes).



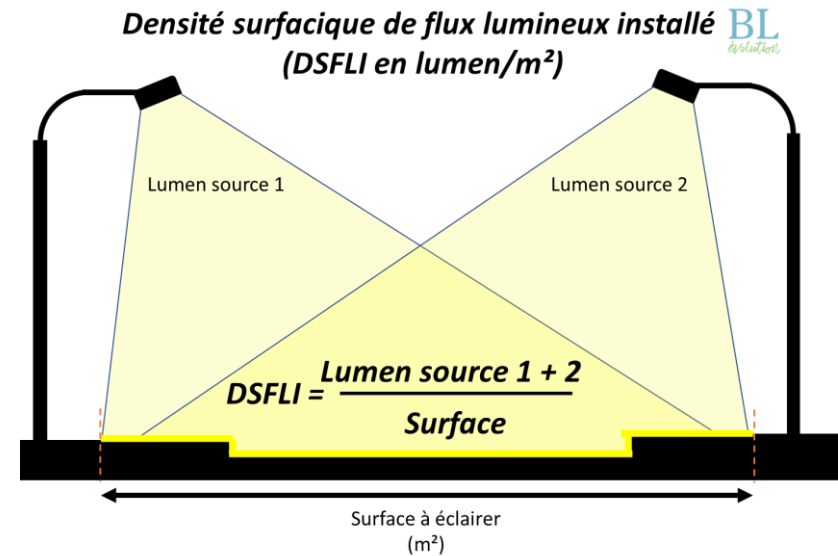
Utiliser un ULOR à 0%. Ce ratio est présent sur chaque fiche descriptive de tout lampadaire. Il exprime (en %) la fraction de flux émis vers le ciel par la source lumineuse (angle de flux total perdu par immixtion).



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.

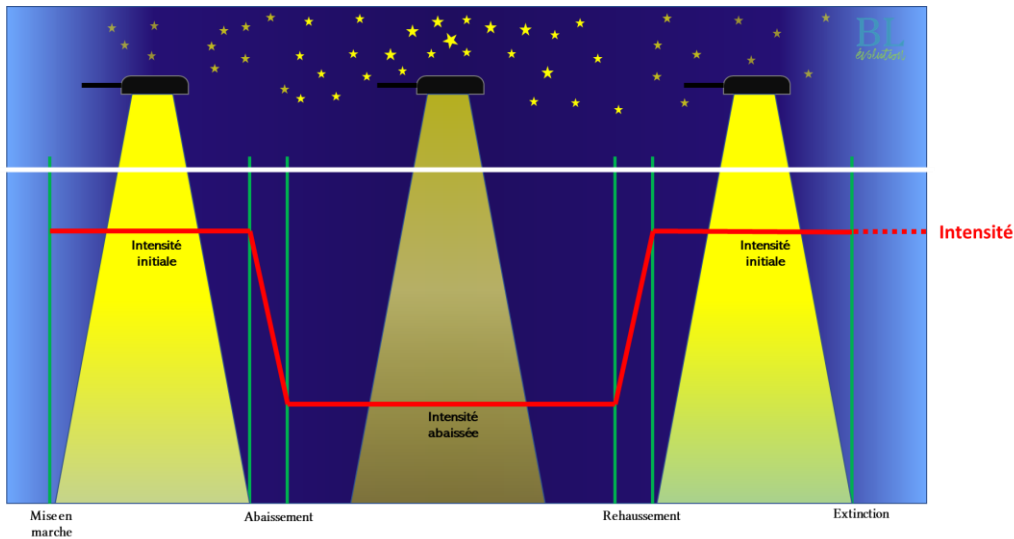


Limitier la densité surfacique de flux lumineux installé.

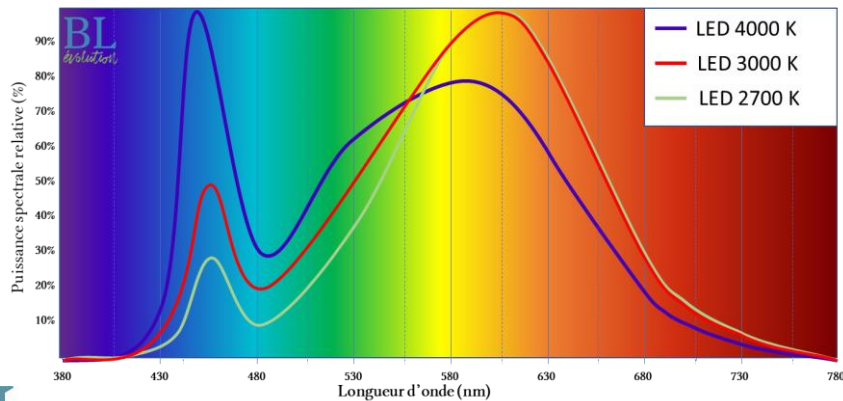


Préconisations techniques d'éclairage

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.

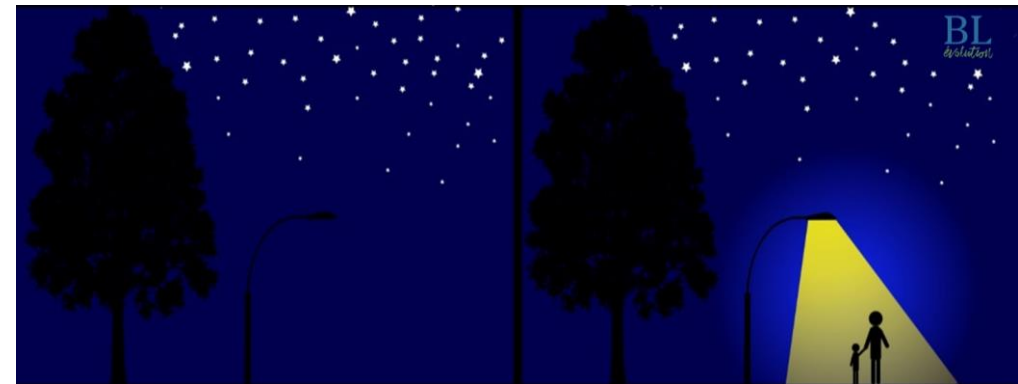


Limitier les puissances installées en portant attention aux meilleurs rendement lumineux.

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

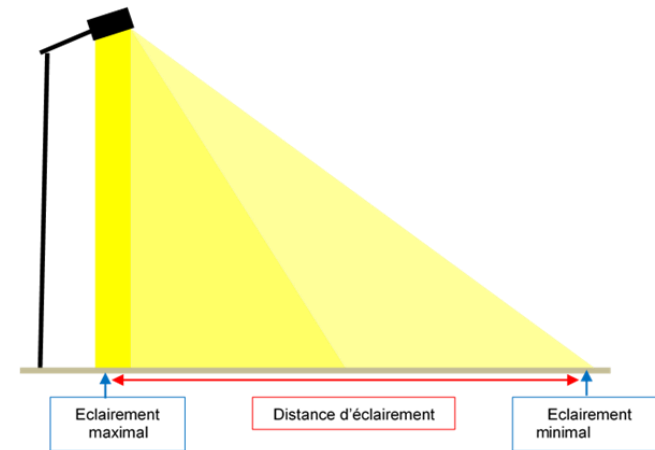
L'objectif de cette phase est de recenser l'ensemble des points lumineux au sein du périmètre et de les localiser grâce à un GPS afin de faciliter la modélisation. Seuls les éclairages du domaine public ont fait l'objet d'une analyse.

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'horizon qui pourrait entrer dans le champ du cône de mesure (nécessite aussi un espace ouvert). Les valeurs sont comprises entre 17,00 (ciel très pollué) et 22,00 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.

