



Métropole  
du Grand Paris

Production d'une cartographie de la pollution  
lumineuse à l'échelle de la Métropole du Grand  
Paris

-

Analyse de l'impact de la pollution lumineuse sur la  
biodiversité

18 avril 2023



# TerrOïko



## SOMMAIRE

<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>2</b>
<b>1. ANALYSES PAR CROISEMENT DES DONNEES DE POLLUTION LUMINEUSE ET BIODIVERSITE</b> .....	<b>3</b>
1. INTRODUCTION.....	3
2. CROISEMENT DE PLUSIEURS APPROCHES METHODOLOGIQUES.....	4
3. DONNEES DE POLLUTION LUMINEUSE .....	6
4. METHODOLOGIE DES CROISEMENTS.....	8
5. ATLAS DES CARTOGRAPHIES DE L'IMPACT DE LA POLLUTION LUMINEUSE SUR LA BIODIVERSITE .....	9
<b>2. SYNTHESE DES ENJEUX D'IMPACT DE LA POLLUTION LUMINEUSE SUR LA BIODIVERSITE</b> .....	<b>11</b>
1. METHODOLOGIE .....	11
2. RESULTATS.....	12
<b>3. APPROCHE STRUCTURELLE</b> .....	<b>14</b>
1. DONNEES UTILISEES .....	14
2. METHODOLOGIE DE CROISEMENT.....	16
3. RESULTATS.....	16
<b>4. APPROCHE INSTITUTIONNELLE</b> .....	<b>21</b>
1. DONNEES UTILISEES .....	21
2. METHODOLOGIE DE CROISEMENT.....	23
3. RESULTATS.....	23
<b>5. APPROCHE INVENTORIALE</b> .....	<b>25</b>
1. DONNEES UTILISEES .....	25
2. METHODOLOGIE DE CROISEMENT.....	27
3. RESULTATS.....	27
<b>6. APPROCHE FONCTIONNELLE</b> .....	<b>29</b>
1. DONNEES UTILISEES .....	29
2. METHODOLOGIE DE CROISEMENT.....	29
3. RESULTATS.....	30
<b>7. CONCLUSIONS</b> .....	<b>32</b>
<b>8. BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>33</b>
<b>ANNEXE 1. ZONATION</b> .....	<b>37</b>
<b>ANNEXE 2. SIMOÏKO</b> .....	<b>44</b>

# 1. ANALYSES PAR CROISEMENT DES DONNÉES DE POLLUTION LUMINEUSE ET BIODIVERSITÉ

## 1. INTRODUCTION

La Trame Verte et Bleue (TVB) est un outil d'aménagement du territoire issu du Grenelle de l'Environnement qui vise à concilier développement territorial et conservation de la biodiversité (loi n°2009-967 dite Grenelle I et loi n°2010-788 dite Grenelle II). Le but est d'assurer le maintien et le bon état de conservation de la biodiversité au sens le plus large de ce terme : de la diversité génétique au sein d'une espèce jusqu'au fonctionnement des écosystèmes et des services qu'ils rendent, tout en permettant le développement territorial.

Concrètement, identifier la TVB d'un territoire, c'est apporter une caractérisation spatiale à 3 questions clairement explicitées par la loi :

- Les espèces peuvent-elles accomplir tout ou partie de leur cycle de vie à travers les habitats disponibles sur le territoire ? Les habitats qui le permettent pour un grand nombre d'espèces (« habitats où la biodiversité est la plus riche ou la mieux représentée ») sont appelés des réservoirs de biodiversité.
- Les espèces peuvent-elles se déplacer librement entre les réservoirs de biodiversité ? Les habitats qui le permettent sont appelés des corridors écologiques.
- Existe-t-il des facteurs de pression qui représentent des obstacles à l'accomplissement du cycle de vie des espèces ? Ces facteurs de pression sont appelés des obstacles.

La déclinaison d'une Trame Verte et Bleue a fait l'objet d'étude à l'échelle de la Métropole du Grand Paris. Néanmoins, et à l'instar de l'échelle nationale, un facteur de pression particulier n'avait que peu été pris en compte : la pollution lumineuse. Or, il est désormais acquis que la lumière artificielle contribue au même titre que l'artificialisation des sols à la perte d'habitat et à la fragmentation du territoire pour la faune et la flore. Dans ce contexte, et dans le cadre d'une politique plus globale de « reconquête de la nuit », une réponse opérationnelle à l'impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité s'organise autour de la notion de Trame Noire.

La Trame Noire est donc une politique qui vise à prendre en compte l'impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité dans le cadre de la planification territoriale. Plus précisément, il est attendu des collectivités qu'elles identifient, spatialisent dans les documents de planifications territoriales les secteurs du territoire où la pollution lumineuse :

- N'impacte pas ou impacte peu l'accomplissement du cycle de vie et les déplacements d'un maximum d'espèces (survie, natalité...). Il s'agit des réservoirs de biodiversité et des corridors

écologiques préservés de la pollution lumineuse. Il est attendu que les collectivités planifient des actions pour les préserver.

- Impacte l'accomplissement du cycle de vie des espèces (survie, natalité...) ou les déplacements des espèces. Il s'agit des obstacles de la Trame Noire. Il est attendu que les collectivités planifient des actions pour les résorber.

Afin d'aider les communes de son territoire à intégrer pleinement l'impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité dans leur outil de planification territoriale, la Métropole du Grand Paris a souhaité disposer de cartographies de la pollution lumineuse et de son impact sur la biodiversité. Dans ce contexte, TerrOïko a valorisé les cartographies de pollution lumineuse établie par DarkSkyLab et La TeleScop en :

- Les croisant avec la définition structurelle et institutionnelle des habitats des espèces du territoire. Ces croisements permettent de classer les habitats suivants leur degré d'atteinte par la pollution lumineuse.
- Les croisant avec une cartographie qui priorise le territoire d'après les connaissances disponibles sur la présence de la faune et la flore. Ces croisements permettent un classement relatif des secteurs les plus riches du territoire en termes d'espèces suivant leur degré d'atteinte par la pollution lumineuse. Ils sont néanmoins à utiliser avec parcimonie car les données d'inventaires disponibles dépendent fortement de la pression d'inventaire.
- En les intégrant dans SimOïko, l'outil de métrologie de la fonctionnalité des continuités écologiques. Cet outil permet de classer les habitats du territoire suivant le degré d'atteinte de la pollution lumineuse sur les tailles des populations, les probabilités de maintien des espèces et le trafic en individus dispersant. Il s'agit ici d'une première analyse fonctionnelle basée seulement sur les chauves-souris.

L'ensemble des cartes de croisements ont été synthétisées en une seule carte représentant la hiérarchisation des enjeux de pollution lumineuse sur la biodiversité du territoire.

## 2. CROISEMENT DE PLUSIEURS APPROCHES METHODOLOGIQUES

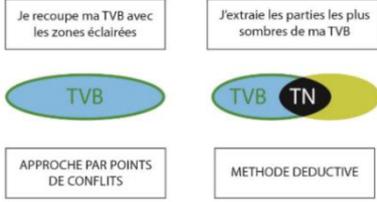
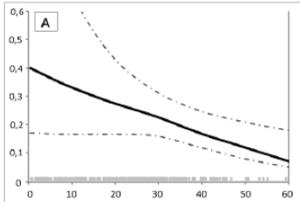
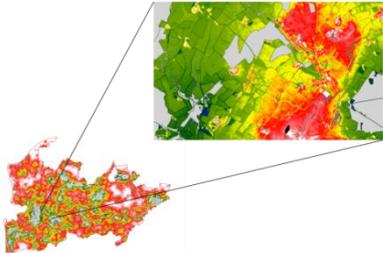
---

Les résultats présentés dans ce document reposent sur plusieurs méthodes d'estimation de l'impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité, disponibles dans la littérature scientifique<sup>1</sup> (Tableau 1).

---

<sup>1</sup> D'après l'analyse de plus de 300 articles scientifiques sur le sujet par TerrOïko

Tableau 1. Approches méthodologiques disponibles pour estimer l'impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité.

Méthodes	Exemples	Description
Structurelle	 <p><i>Exemple de retranscription des résultats de niveau de sensibilité dans les milieux prairiaux (DarkSkylab)</i></p>	<p>Les données de pollution lumineuse sont croisées avec les différentes typologies des données d'occupation du sol. Cette approche structurelle permet de classer les éléments du paysage suivant le degré de pollution lumineuse qu'ils reçoivent.</p>
Institutionnelle	 <p><i>Sordello 2017</i></p>	<p>Les données de pollution lumineuse sont croisées avec les définitions réglementaires des habitats. Cette approche institutionnelle vise à classer les éléments des trames verte et bleue ou des zonages réglementaires suivant le degré de pollution lumineuse qu'ils reçoivent.</p>
Inventoriale - Suivis biodiversité et analyses statistiques (souvent modèles de niches - modèle linéaire)	 <p><i>Lien entre la probabilité de présence et la pollution lumineuse (Auddice biodiversite, thèse de Julie Pauwels)</i></p>	<p>Cette approche vise à mesurer à l'aide d'outils statistiques les relations entre la présence/abondance/suivis des espèces et des paramètres de l'environnement dont la lumière. Lorsque ces relations sont bien établies, une extrapolation est faite à l'ensemble des milieux.</p>
Fonctionnelle	 <p><i>Exemple de la modélisation du trafic en individus à l'échelle du Parc des Caps et Marais d'Opale (TerrOïko)</i></p>	<p>Cette approche vise à intégrer les impacts connus de la pollution lumineuse sur la vie des espèces (fécondité, survie, déplacement, capacité biotique) dans un modèle d'analyse des réseaux écologiques et de la viabilité des populations (SimOïko)</p>

		afin de spatialiser les enjeux d'un territoire.
--	--	---

### 3. DONNEES DE POLLUTION LUMINEUSE

---

A ces fins, les quatre indicateurs de pollution lumineuse produits par la Telescop et DarkSkyLab dans le cadre de la cartographie de la pollution lumineuse à l'échelle de la Métropole du Grand Paris ont été exploités (Figure 1) :

- La radiance totale, soit la lumière émise vers le ciel et mesurée par satellites très haute résolution (satellites Jilin), sur l'ensemble du périmètre de la Métropole du Grand Paris, à la maille de 5 m,
- L'indice de brillance du fond de ciel nocturne (ou Night Sky Brightness - NSB en anglais), soit la quantité de lumière artificielle présente dans le ciel, ou encore la capacité d'un observateur à voir les étoiles,
- La pression liée à la pollution lumineuse diffuse, soit l'indice de pression relative due aux différentes sources d'éclairage artificiel (public et privé) en partie responsable de la pollution lumineuse diffuse, restituée à la maille de 50 m sur l'ensemble du périmètre de la Métropole du Grand Paris,
- Le nombre de sources visibles pour un observateur à 1 m du sol.

Ces quatre indicateurs ont été utilisés dans les approches structurelle, institutionnelle, et inventoriale. La simulation de l'impact de la pollution lumineuse sur la vie des espèces avec SimOïko s'effectue en prenant uniquement en compte la radiance totale.

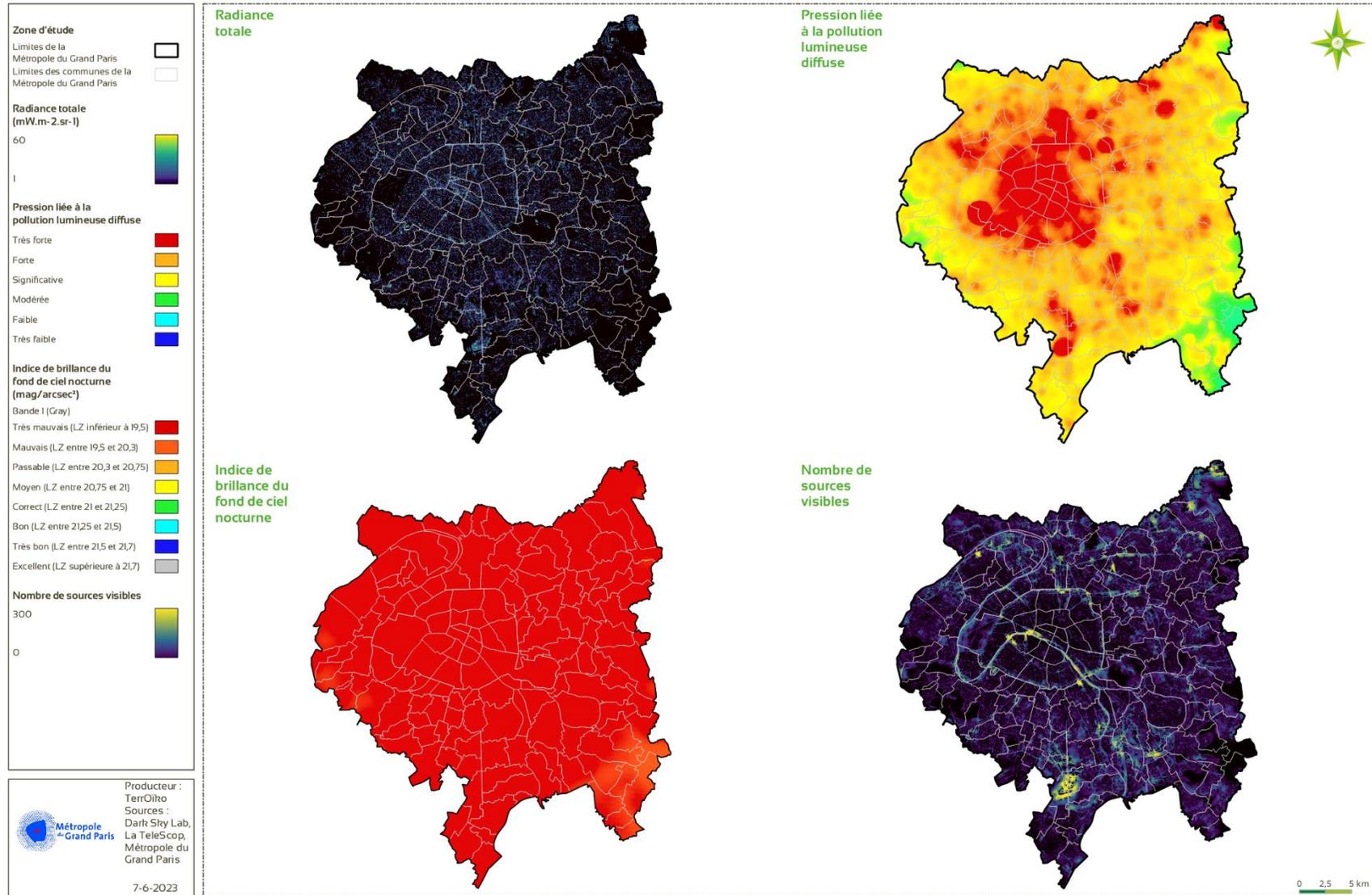


Figure 1. Les quatre indicateurs de pollution lumineuse produits lors de cette étude à l'échelle de la Métropole du Grand Paris.

## 4. METHODOLOGIE DES CROISEMENTS

---

Concernant **les approches institutionnelles et structurelles**, les éléments à croiser avec les rasters de pollution lumineuse sont de type polygone. Le principe du croisement est de faire une moyenne ou de relever la valeur maximale des pixels de la pollution lumineuse qui se trouvent dans chaque polygone. Or, certains polygones sont très étendus et peuvent couvrir plusieurs hectares. Moyenner les informations de pollution lumineuse à une échelle si large peut « diluer » l'information et ne permet pas de localiser des enjeux plus locaux. Les éléments de type polygone sont donc systématiquement recoupés avec une grille de 50 x 50 m couvrant la zone d'étude, afin que chacun ne soit pas plus grand que 2 500 m<sup>2</sup>. La moyenne et le maximum de chaque indicateur de pollution lumineuse ont ensuite été calculés pour chaque polygone.

Concernant **l'approche inventoriale**, tous les éléments à croiser sont de type raster. Le principe du croisement est alors de classer chaque pixel de la résolution la plus fine selon sa valeur de pollution lumineuse et sa valeur calculée par le logiciel Zonation (cf Annexe 1), afin d'évaluer les pixels à faible ou fort enjeu de biodiversité et faible ou forte pollution lumineuse.

Dans chacune des approches institutionnelles, structurelles, et inventoriales, pour plus de lisibilité, les valeurs de pollution lumineuse sont catégorisées en 4 niveaux de faible à très fort, selon les seuils présentés dans le Tableau 2.

Concernant **l'approche fonctionnelle**, les données de pollution lumineuse sont intégrées comme coût supplémentaire pour les espèces ou groupes d'espèces dans leur cycle de vie (diminution de la survie et/ou de fécondité, des capacités biotiques des milieux...) et leur déplacement (éviter les zones trop fortement lumineuses) d'après les **connaissances scientifiques disponibles** et les **avis des experts des territoires**.

Une carte de hiérarchisation des enjeux liés à la pollution lumineuse a été produite en combinant les résultats des croisements de l'indicateur moyen de pression liée à la pollution lumineuse diffuse avec les approches institutionnelle, structurelle et inventoriale. En effet, **l'indicateur de pression liée à la pollution lumineuse diffuse** varie en fonction de la contribution des différentes sources à la pollution lumineuse diffuse. Cet indicateur semble le plus intégrateur et variable sur la zone d'étude, aussi notre hiérarchisation des enjeux est prioritairement basée sur cet indicateur-ci. La carte de fonctionnalité produite à partir de la guildes des chiroptères et de la radiance totale est à examiner en complément de cette carte de hiérarchisation.

Tableau 2. Seuils de chaque élément des croisements utilisés pour le classement en 4 niveaux de pollution lumineuse.

Niveau de pollution	Faible	Modéré	Fort	Très fort
Radiances totale (mW.m <sup>-2</sup> .sr <sup>-1</sup> )	< 9	entre 9 et 25	entre 25 et 50	>= 50
NSB (mag/arcsec <sup>2</sup> )	< 21,5	entre 21 et 21,5	entre 20,5 et 21	=< 20,5
Pression de la pollution lumineuse diffuse	< 2	entre 2 et 4	entre 4 et 6	>= 6
Nombre de sources lumineuses visibles	< 9	entre 9 et 65	entre 65 et 120	>= 120

## 5. ATLAS DES CARTOGRAPHIES DE L'IMPACT DE LA POLLUTION LUMINEUSE SUR LA BIODIVERSITE

N-B : Les résultats des croisements obtenus sont présentés sous forme de cartes à l'échelle de la Métropole du Grand Paris. Afin d'améliorer la lisibilité de ce rapport et étant donné le nombre important de cartes produites, la totalité des cartes d'analyse de l'impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité sont présentées dans un atlas cartographique « Atlas\_cartographique\_Analyses\_Croisements\_PL.pdf ». Seules les cartes principales sont intégrées dans le présent document.

Le Tableau 3 ci-dessous liste toutes les cartes de résultats obtenues et leur numéro de page dans l'atlas. L'indicateur de pression liée à la pollution lumineuse diffuse varie en fonction de la contribution des différentes sources à la pollution lumineuse diffuse. Cet indicateur semble le plus intégrateur et variable sur la zone d'étude, aussi les résultats présentés dans le présent rapport sont basés sur les croisements effectués avec cet indice. Les croisements avec les autres indicateurs sont fournis dans l'atlas cartographique des résultats.

Tableau 3. Liste des croisements effectués entre les différentes approches et les différents indicateurs de pollution lumineuse. Ces cartes sont disponibles dans l'atlas cartographique des résultats, leur numéro de page étant indiqué dans la case correspondante de ce tableau.

Approche	Croisement avec la pollution lumineuse	Radiance totale		Indice de brillance du fond de ciel nocturne (NSB)		Pression liée à la pollution lumineuse diffuse		Nombres de sources lumineuses visibles	
		Moyenne	Maximale	Moyenne	Maximale	Moyenne	Maximale	Moyenne	Maximale
Institutionnelle	Zonages d'inventaire	p. 4	p. 5	p. 6	p. 7	p. 8	p. 9	p. 10	p. 11
	Zonages réglementaires	p. 12	p. 13	p. 14	p. 15	p. 16	p. 17	p. 18	p. 19
	Réservoirs du SRCE 2013	p. 20	p. 21	p. 22	p. 23	p. 24	p. 25	p. 26	p. 27
	Corridors du SRCE 2013	p. 28	p. 29	p. 30	p. 31	p. 32	p. 33	p. 34	p. 35
	Trame verte	p. 36	p. 37	p. 38	p. 39	p. 40	p. 41	p. 42	p. 43
Structurelle	Milieux boisés	p. 44	p. 45	p. 46	p. 47	p. 48	p. 49	p. 50	p. 51
	Milieux ouverts	p. 52	p. 53	p. 54	p. 55	p. 56	p. 57	p. 58	p. 59
	Milieux humides	p. 60	p. 61	p. 62	p. 63	p. 64	p. 65	p. 66	p. 67
	Cours d'eau	p. 68	p. 69	p. 70	p. 71	p. 72	p. 73	p. 74	p. 75
Inventoriale	ZONATION	p. 76		p. 77		p. 78		p. 79	
Fonctionnelle	SimOïko	pp. 80-82							

## 2. SYNTHÈSE DES ENJEUX D'IMPACT DE LA POLLUTION LUMINEUSE SUR LA BIODIVERSITÉ

La **carte de hiérarchisation des enjeux d'impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité sur le territoire de la Métropole du Grand Paris** (Figure 2) fait la synthèse des analyses détaillées dans la suite du document. Elle a été obtenue à partir des croisements de l'indicateur de pression liée à la pollution lumineuse diffuse avec les différentes approches concernées.

### 1. METHODOLOGIE

---

La carte de hiérarchisation des enjeux liés à la pollution lumineuse a été produite en combinant les résultats des croisements de l'indicateur moyen de pression liée à la pollution lumineuse diffuse avec les approches institutionnelle, structurelle et inventoriale. En effet, **l'indicateur de pression liée à la pollution lumineuse diffuse** varie en fonction de la contribution des différentes sources à la pollution lumineuse diffuse. Cet indicateur semble le plus intégrateur et variable sur la zone d'étude, aussi notre hiérarchisation des enjeux est prioritairement basée sur cet indicateur-ci.

Le territoire a été analysé sous forme de rasters composés de pixels de 5 x 5 m de résolution. La méthodologie de croisement a produit pour chaque approche (institutionnelle, structurelle et inventoriale) des rasters de niveau de pollution de l'indicateur de la pression liée à la pollution lumineuse pour chaque élément de l'approche. Ces rasters sont catégorisés selon les niveaux d'enjeux de pollution lumineuse décrits dans le Tableau 2. Afin de combiner ces différents rasters, une valeur moyenne a été affectée à chaque catégorie d'enjeu du Tableau 2 :

- 0,125 pour un enjeu faible
- 0,375 pour un enjeu modéré
- 0,625 pour un enjeu fort
- 0,875 pour un enjeu très fort

Pour chaque approche, la somme des valeurs des éléments par pixel a été effectuée. Une normalisation par rapport au minimum (0,125) et maximum théorique (0,875\*le nombre d'éléments) a été réalisée, créant une carte de hiérarchisation d'enjeu par approche. Ensuite, la somme des cartes de hiérarchisation d'enjeu des 3 approches, normalisée entre le minimum théorique 0 et le maximum théorique 3, permet d'obtenir la carte finale de la hiérarchisation des enjeux de pollution lumineuse sur le territoire.

## 2. RESULTATS

---

Cette hiérarchisation (Figure 2) met évidemment en lumière **des enjeux très forts sur la ville de Paris et sa périphérie**, en particulier au niveau des **Bois de Boulogne et de Vincennes**. Plus généralement **la grande majorité des parcs et grands espaces verts** de la Métropole du Grand Paris présentent de forts enjeux liés à la pollution lumineuse, comme le Parc Jean Moulin – Les Guilands, le sud du Parc de la Courneuve, l'extrémité nord de l'Île-Saint-Denis, ou encore le stade municipal Huvier. La Seine est aussi concernée par ces niveaux d'impact. **La Trame verte de la Métropole du Grand Paris est à plus de 89 % touchée** par de la pollution lumineuse forte à très forte. 85 % de la surface en milieu ouvert, 42 % de la surface en milieu boisé et 18 % de celle des milieux humides et enfin 98% des linéaires de cours d'eau sont soumis à des pressions de pollution lumineuse forte à très forte. Plus de la moitié de la surface des zonages d'inventaire (ZNIEFF) et plus de 70 % des zonages réglementaires sont soumis à une pollution lumineuse forte à très forte, comme plus de 60 % des corridors et 80 % des réservoirs du SRCE.

Seul le cœur **des grands ensembles forestiers à forte valeur patrimoniale reste relativement bien préservé de la pollution lumineuse** (en bleu foncé sur la figure 2), tels que ceux de la **Forêt domaniale de Notre-Dame, de Meudon, et de Fausses-Reposes**. Ces ensembles forestiers à forts enjeux de biodiversité doivent donc **être préservés** de la pollution lumineuse qui impacte déjà grandement leurs marges.

Figure 2. Hiérarchisation des enjeux liés à la pollution lumineuse basée sur des approches institutionnelle, structurelle inventoriale.



**Zone d'étude**

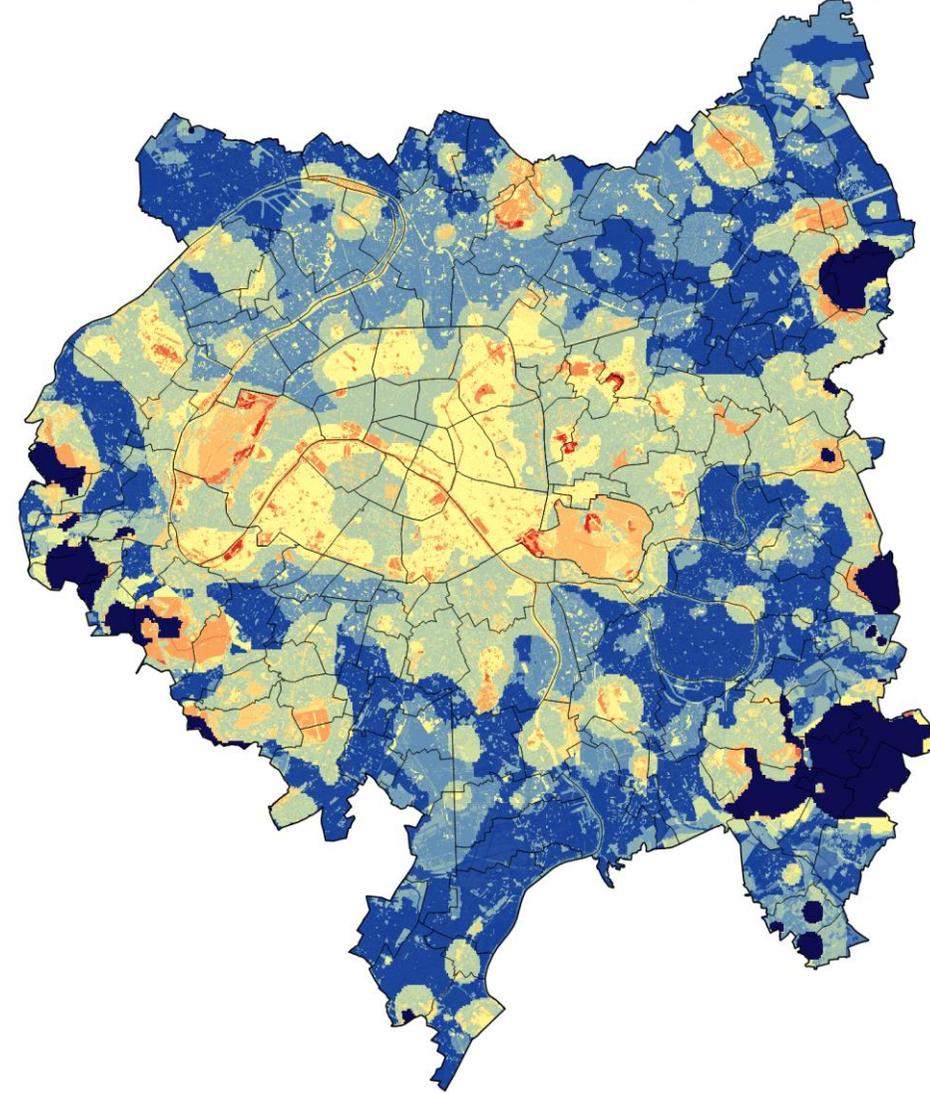
- Limites de la Métropole du Grand Paris
- Limites des communes de la Métropole du Grand Paris

**Hiérarchisation des enjeux liés à la pollution lumineuse**

- Enjeu très fort
- Enjeu fort à très fort
- Enjeu fort
- Enjeu modéré à fort
- Enjeu modéré
- Enjeu faible à modéré
- Enjeu faible
- Enjeu très faible, et espace à faible enjeu de biodiversité
- Enjeu très faible, et espace à fort enjeu de biodiversité

Producteur :  
 TerrOïko  
 Sources :  
 TerrOïko,  
 Dark Sky Lab,  
 La TeleScop,  
 Métropole du  
 Grand Paris  
 6-4-2023

CARTOGRAPHIE DE LA POLLUTION LUMINEUSE À L'ÉCHELLE DE LA MÉTROPOLÉ DU GRAND PARIS  
 ANALYSES PAR CROISEMENT  
 Hiérarchisation des enjeux liés à la pollution lumineuse



### 3. APPROCHE STRUCTURELLE

#### 1. DONNEES UTILISEES

---

Les 4 indicateurs de pollution lumineuse sont croisés avec les différentes typologies des données d'occupation du sol présentes dans le MOS 2017 81 postes fourni par la Métropole du Grand Paris (Figure 3). Cette approche structurelle permet de classer les éléments du paysage suivant le degré de pollution lumineuse qu'ils reçoivent. Quatre typologies de milieux sont considérées :

- Les milieux boisés (codes MOS 1, 2, 3 et 5),
- Les milieux ouverts (codes MOS 4, 6, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 22, 23, et 25),
- Les milieux humides (code MOS 11 « Eau fermée (étangs, lacs...) et la couche Milieux\_humides\_Sect\_conc\_mares\_forestiers.shp fournie par la Métropole du Grand Paris),
- Les cours d'eau (codes MOS 11 « Cours d'eau » et 12).

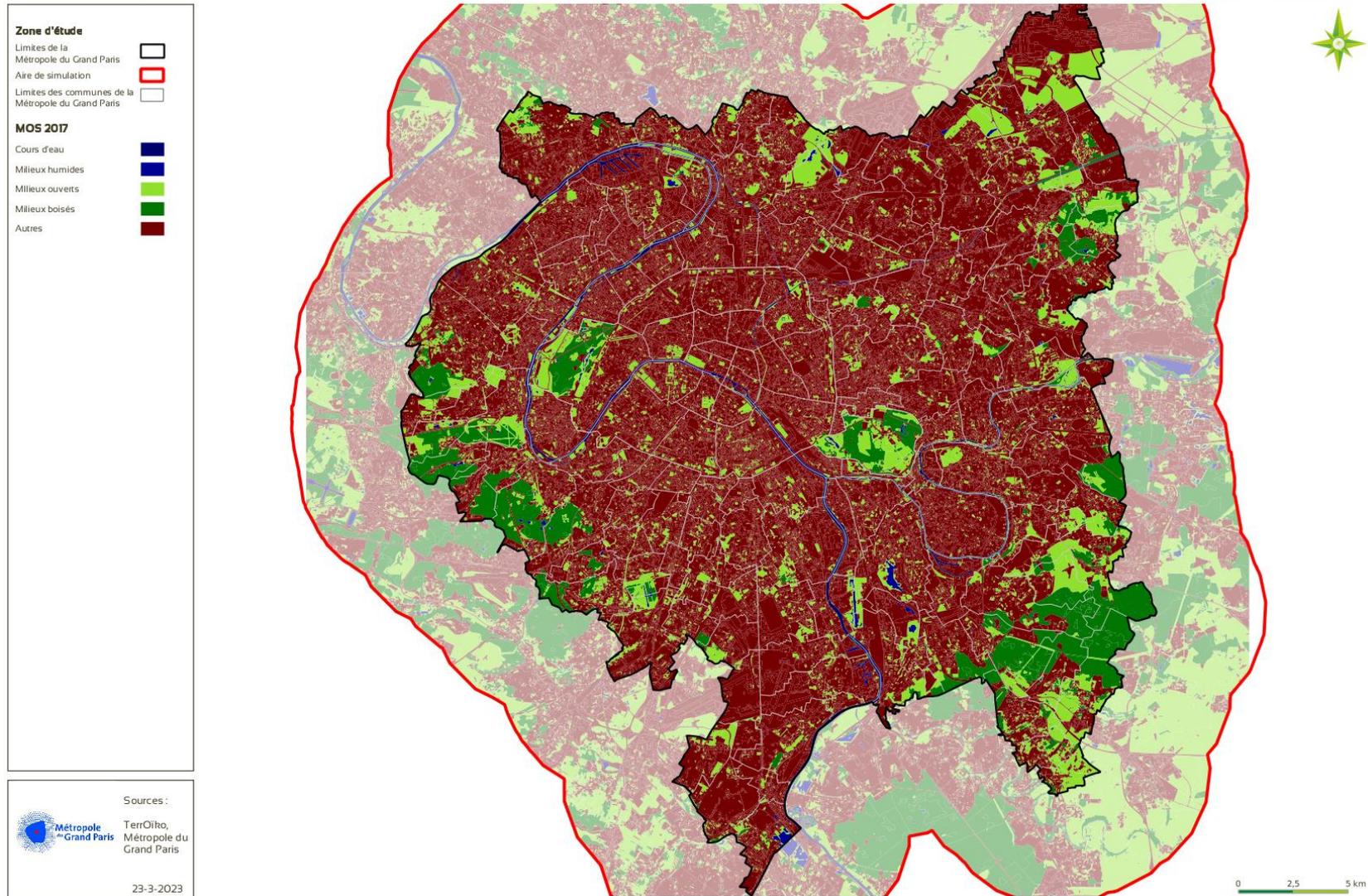


Figure 3. Représentation des données structurelles du MOS 2017.

## 2. METHODOLOGIE DE CROISEMENT

---

Les milieux décrits dans le MOS 2017 sont représentés par des polygones, et la pollution lumineuse par des pixels. Ces milieux ont donc été découpés par une grille de 50 x 50 m couvrant la zone d'étude, afin que chaque polygone ne soit pas plus grand que 2 500 m<sup>2</sup>. La moyenne et le maximum de chaque indicateur de pollution lumineuse ont ensuite été calculés pour chaque polygone de chaque milieu étudié.

## 3. RESULTATS

---

Les résultats sont présentés sous forme d'une carte permettant de prioriser les enjeux de biodiversité au regard de la pollution lumineuse (Figure 4). Les cartes individuelles des résultats sont présentes pp. 44-75 de l'atlas cartographique des résultats.

Plus de **85 % de la surface en milieu ouvert** de la Métropole du Grand Paris est soumise à une pollution lumineuse forte à très forte. Les milieux ouverts de la ville de Paris et au nord de celle-ci sont les plus soumis à cette pollution. Ceux du Parc de Choisy sont également très fortement impactés. Seuls quelques espaces ouverts en marge de la Métropole sont peu impactés, comme le sud de Marolles-en-Brie, Noisieu, ou l'est de Tremblay-en-France.

Plus de **42 % de la surface en milieu boisé et 18 % de celle des milieux humides** sont également soumis à une pollution lumineuse forte à très forte. Les Bois de Boulogne et de Vincennes sont les plus impactés, jusque dans leur cœur, tandis que les Forêts domaniales de Notre-Dame, de Meudon, et de Fausses-Reposes sont relativement épargnées en leur cœur.

Concernant **les cours d'eau, plus de 98 % de leur surface** est fortement à très fortement impactée par la pollution lumineuse, en particulier lors de la traversée de Paris et en aval de la ville. Seule une portion de la Seine dans la ville d'Athis-Mons semble moins impactée.

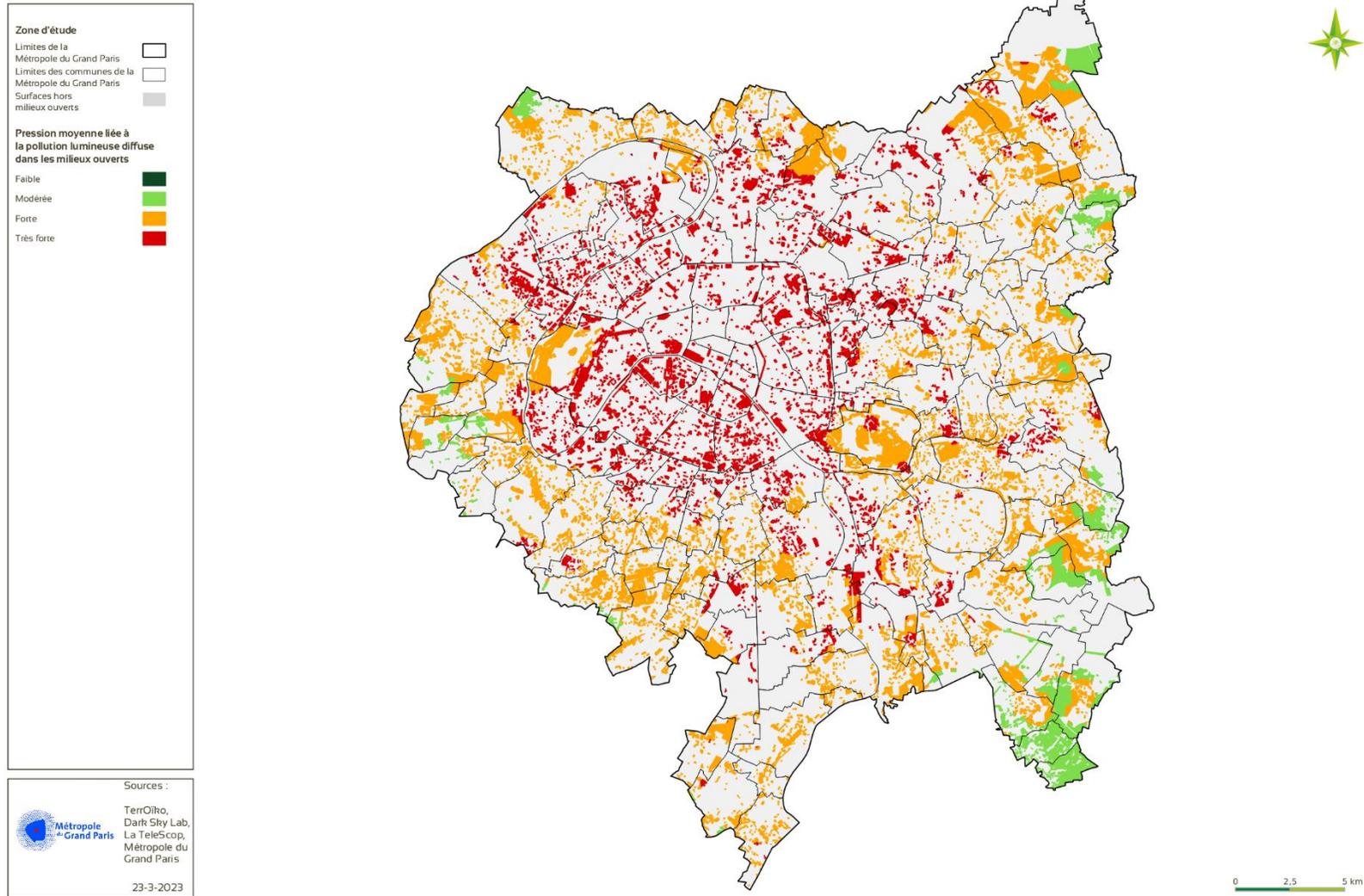


Figure 4. Moyenne de la pression liée à la pollution lumineuse diffuse dans les milieux ouverts.

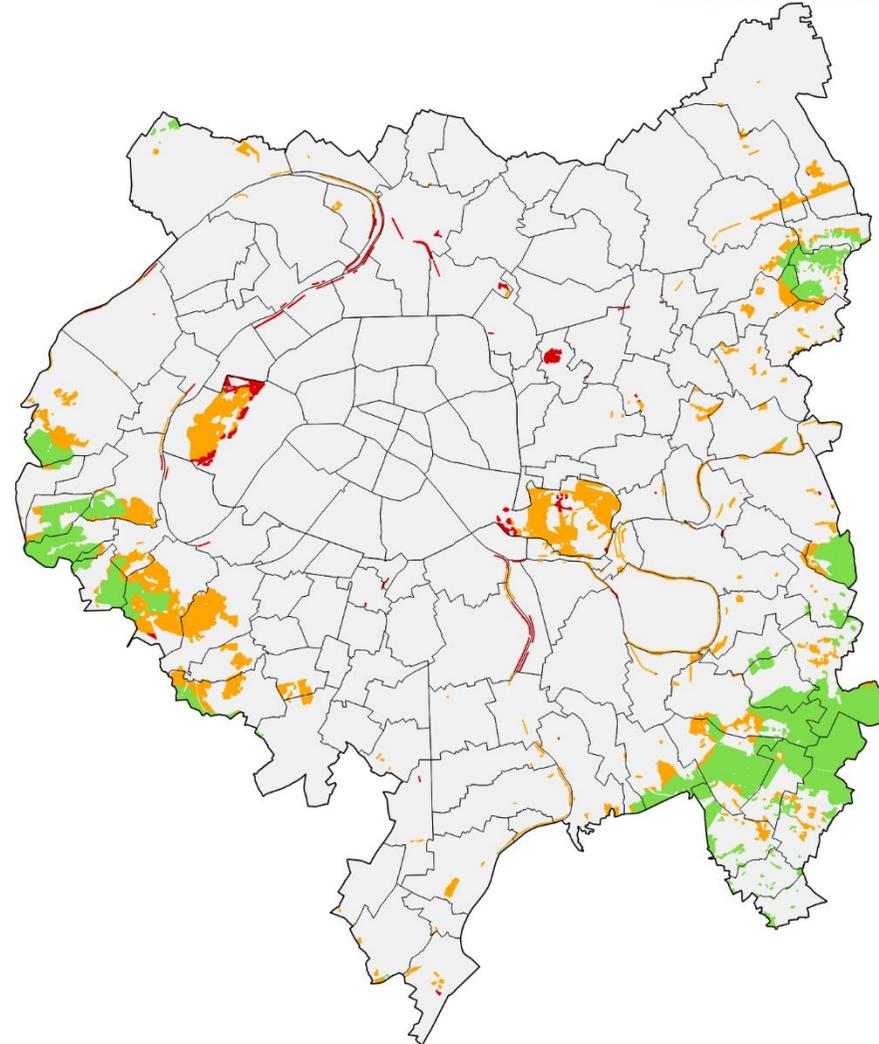


Figure 5. Moyenne de la pression liée à la pollution lumineuse diffuse dans les milieux boisés.

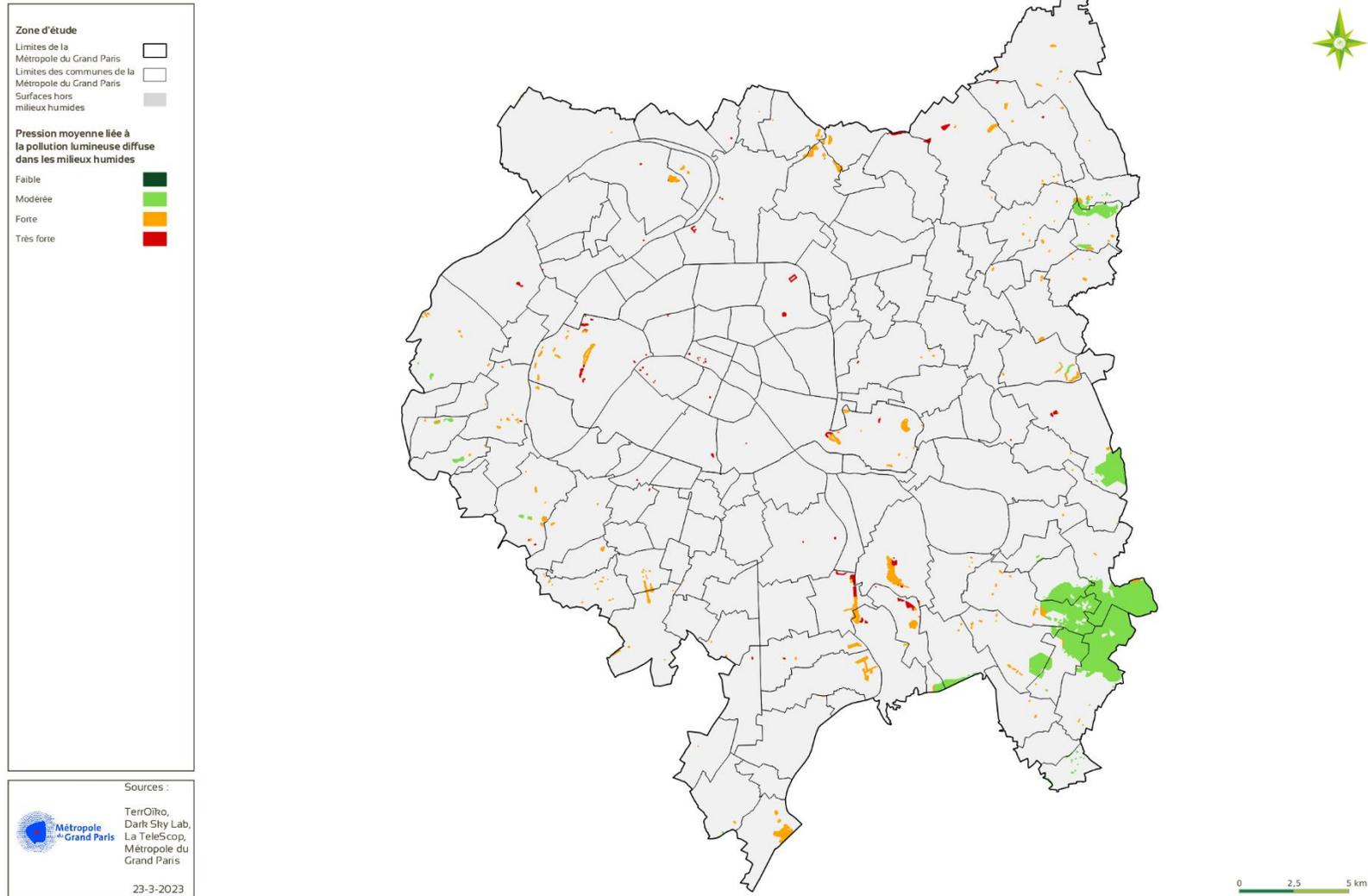


Figure 6. Moyenne de la pression liée à la pollution lumineuse diffuse dans les milieux humides.

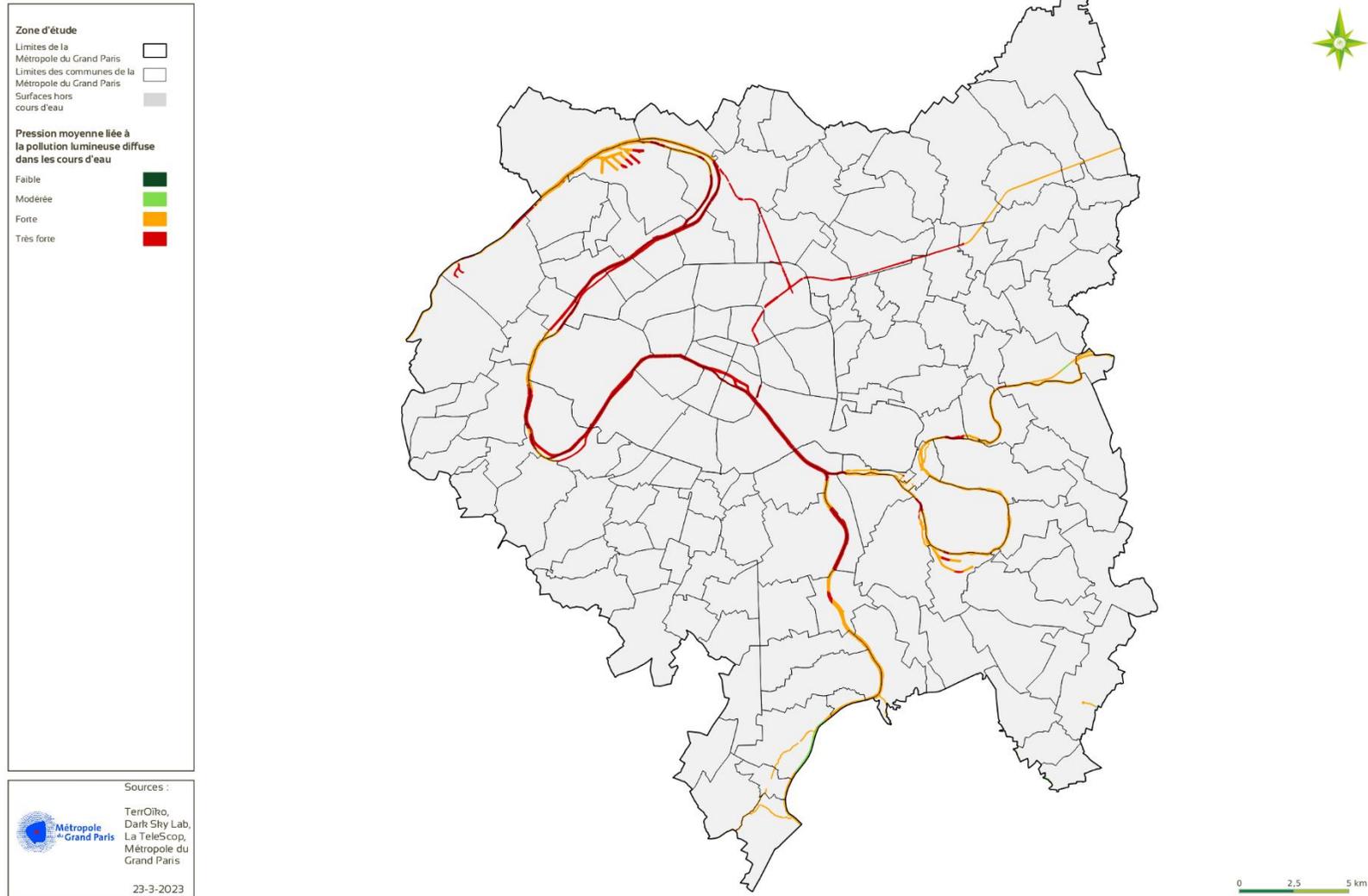


Figure 7. Moyenne de la pression liée à la pollution lumineuse diffuse dans les cours d'eau.

## 4. APPROCHE INSTITUTIONNELLE

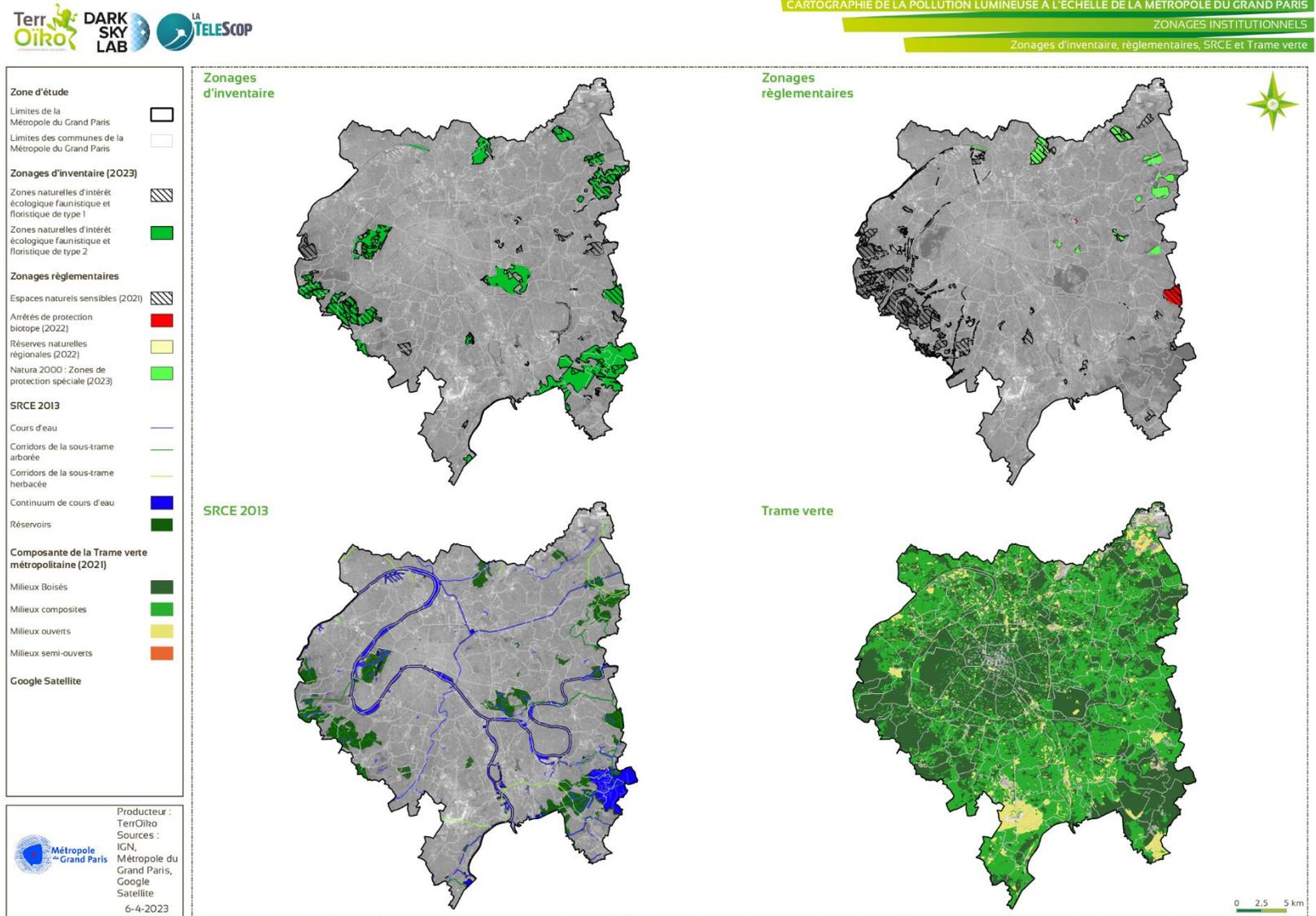
### 1. DONNEES UTILISEES

---

Les 4 indicateurs de pollution lumineuse sont croisés avec les définitions réglementaires des habitats. Cette approche institutionnelle vise à classer les éléments des différents zonages suivant le degré de pollution lumineuse qu'ils reçoivent. Quatre types de zonages sont considérés (Figure 8) :

- Les zonages d'inventaires mis à disposition par l'IGN (ZNIEFF en date de 2023).
- Les zonages règlementaires mis à disposition par l'IGN (ENS en date de 2021, APB et RNR en date de 2022, et ZPS en date de 2023).
- Les réservoirs et corridors du SRCE (Schéma Régional de Cohérence Écologique) en date de 2013 fournis par la Métropole du Grand Paris.
- Les composantes de la trame verte fournis par la Métropole du Grand Paris (en date de 2021).

Figure 8. Définitions réglementaires des habitats à l'échelle de la Métropole du Grand Paris.



## 2. METHODOLOGIE DE CROISEMENT

---

Les milieux décrits dans les différents zonages sont représentés par des polygones, et la pollution lumineuse par des pixels. Ces zonages ont donc été découpés avec une grille de 50 x 50 m couvrant la zone d'étude, afin que chaque polygone ne soit pas plus grand que 2 500 m<sup>2</sup>. La moyenne et le maximum de chaque indicateur de pollution lumineuse ont ensuite été calculés pour chaque polygone de chaque zonage étudié.

## 3. RESULTATS

---

Les résultats sont présentés sous forme d'une carte permettant de prioriser les enjeux de biodiversité au regard de la pollution lumineuse (Figure 9). Les cartes individuelles des résultats sont présentes pp. 4-43 de l'atlas cartographique des résultats.

Plus de la **moitié de la surface des zonages d'inventaire** (ou ZNIEFF) et plus de **70 % des zonages réglementaires** sont soumis à une pollution lumineuse forte à très forte, comme plus de **60 % des corridors** et **80 % des réservoirs du SRCE**. Tous les cours d'eau (réservoirs du SRCE), ainsi que les Bois de Boulogne et de Vincennes et les Parc de la Courneuve et Jean Moulin – Les Guilands sont fortement impactés. Les Forêts domaniales de Notre-Dame, de Meudon, et de Fausses-Reposes sont relativement épargnées en leur cœur.

La **Trame verte de la Métropole du Grand Paris est à plus de 89 %** touchée par de la pollution lumineuse forte à très forte. Les zones les plus impactées sont la ville de Paris et le nord de celle-ci, ainsi qu'un couloir allant de Paris à la gare de triage de Villeneuve-Saint-Georges en passant par Maisons-Alfort. Les zones entre Rungis et Orly sont également fortement impactées.

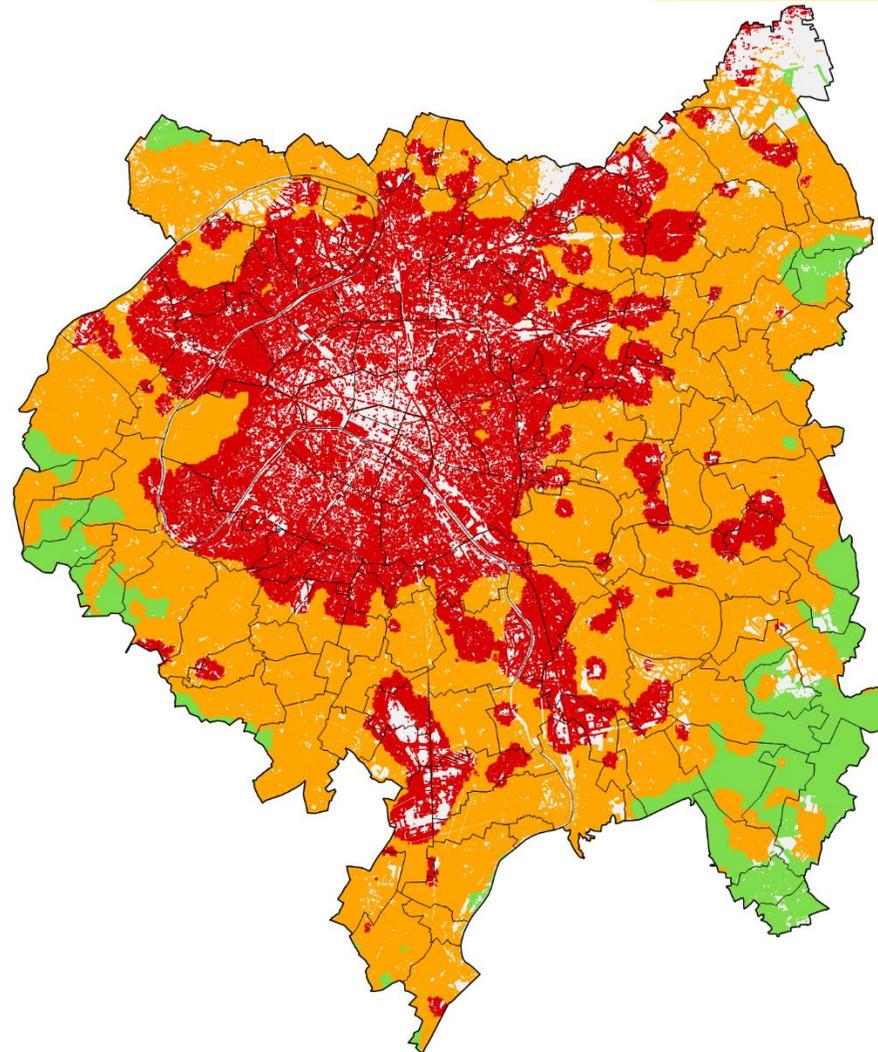


Figure 9. Pression moyenne liée à la pollution lumineuse diffuse dans les composantes de la Trame verte.

## 5. APPROCHE INVENTORIALE

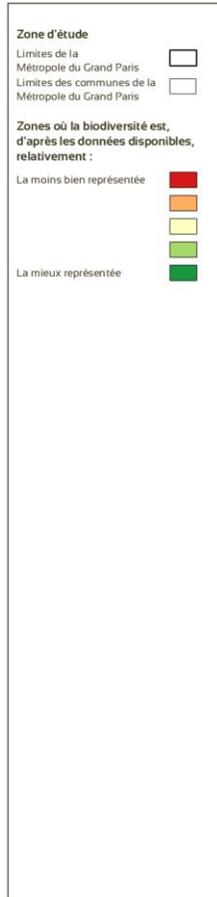
### 1. DONNEES UTILISEES

---

Zonation est un logiciel libre d'accès, développé par le groupe de biologie de la conservation de l'université d'Helsinki et reconnu par les acteurs de la biodiversité. Zonation est un outil d'aide à la décision dans l'identification et la hiérarchisation des zones essentielles à mettre en réserve pour garantir une préservation optimale de la biodiversité à partir des données d'inventaires disponibles sur un territoire. Le modèle donne une note à chaque cellule du territoire qui traduit le pourcentage du territoire à protéger pour maximiser la protection de la biodiversité. La configuration utilisée dans cette étude prend en compte toutes les espèces présentes dans une cellule et donne ainsi plus de poids à la diversité, favorisant ainsi les zones avec plus de biodiversité par rapport aux zones pouvant être significatives pour l'existence d'une ou deux espèces seulement. Une description détaillée du modèle ainsi que de son paramétrage est présentée en annexe 1.

Dans le cadre de cette étude, Zonation est utilisé pour hiérarchiser les enjeux sur les réservoirs de biodiversité en valorisant les données d'inventaires disponibles sur la Métropole du Grand Paris (Figure 10). L'ensemble des données d'inventaires de GeoNat'IdF et de la LPO à partir de 2010 concernant la faune et la flore du territoire français sont utilisées. Le diagnostic est réalisé en l'état des connaissances que nous savons imparfaites (la connaissance absolue en biodiversité n'est pas accessible). La pression d'inventaire n'est pas non plus uniforme sur le territoire. Ainsi, il ne s'agit de pas d'utiliser Zonation pour hiérarchiser les enjeux sur les réservoirs de biodiversité dans l'absolu, mais plutôt relativement à nos connaissances. Aussi les résultats de Zonation ne seront pas pris comme le résultat de l'état des enjeux biodiversité du territoire mais plutôt comme une aide à la décision nous permettant d'affiner notre connaissance et de cibler les secteurs où nous pensons qu'elle est lacunaire.

Figure 10.  
Priorisation des enjeux biodiversité d'après les données d'inventaire par le logiciel ZONATION.



Sources :

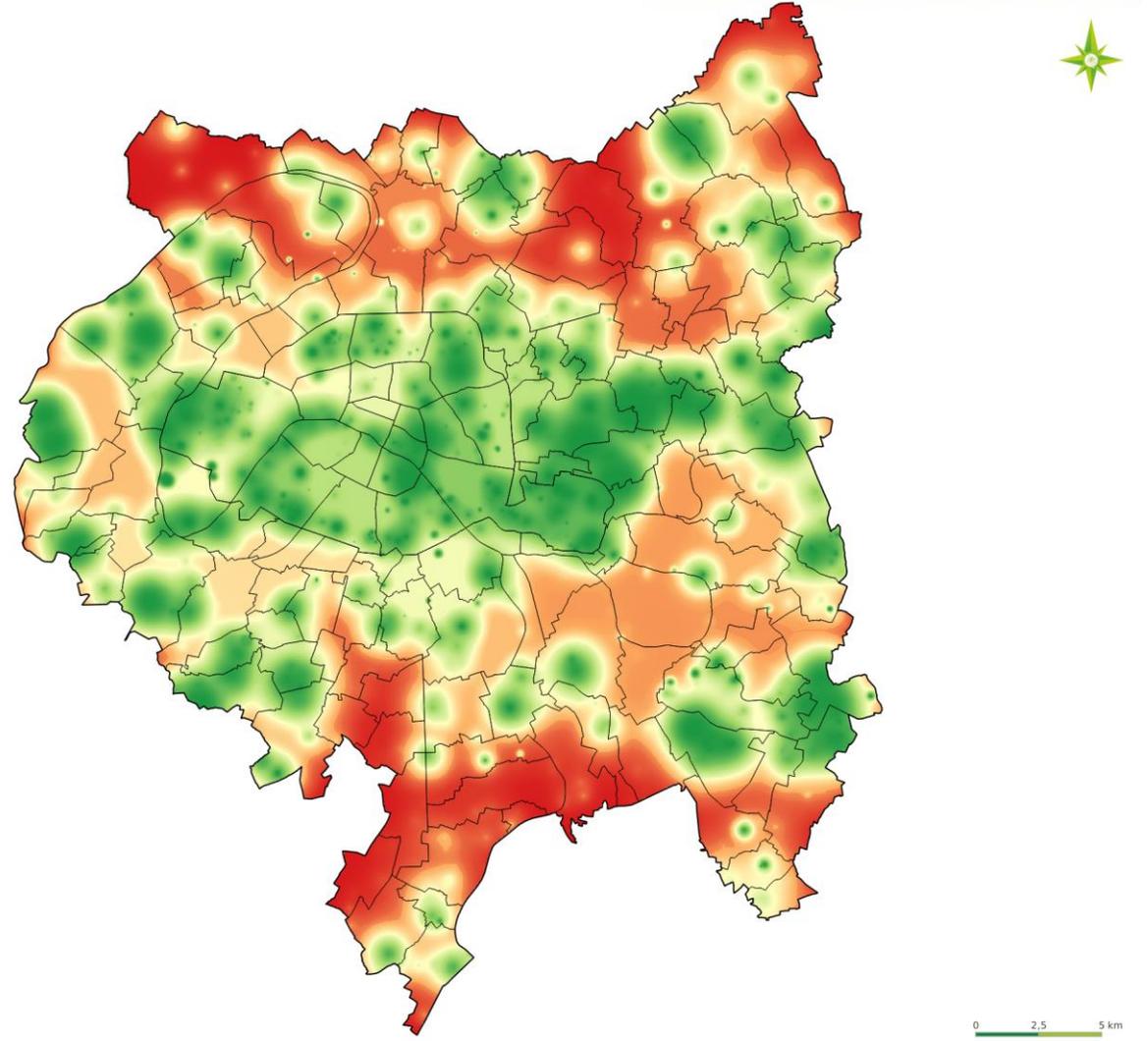
TerrOïko,  
Dark Sky Lab,  
La Telescop,  
Métropole du Grand Paris

24-3-2023

CARTOGRAPHIE DE LA POLLUTION LUMINEUSE À L'ÉCHELLE DE LA MÉTROPOLÉ DU GRAND PARIS

APPROCHE INVENTORIALE

Représentation de la biodiversité d'après les données existantes



## 2. METHODOLOGIE DE CROISEMENT

Chaque pixel de la résolution 5 x 5 m correspondant à celle des indicateurs de pollution lumineuse est classé en 8 catégories selon sa valeur de pollution lumineuse et sa valeur calculée par le logiciel Zonation, afin d'évaluer les pixels à faible ou forte biodiversité et faible ou forte pollution lumineuse (Figure 11). Les seuils de chaque élément des croisements sont présentés dans le Tableau 2 et la Figure 11.

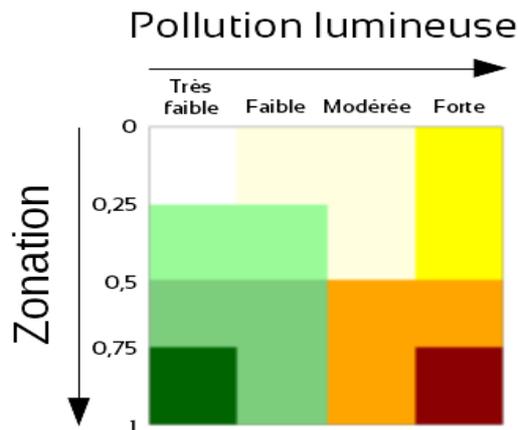


Figure 11. Classement en 8 catégories du résultat du croisement selon la valeur de pollution lumineuse et sa valeur calculée par le logiciel ZONATION.

## 3. RESULTATS

Les résultats sont présentés sous forme de carte permettant de prioriser les enjeux de biodiversité au regard de la pollution lumineuse (Figure 12). Les cartes individuelles des résultats sont présentes pp. 73-77 de l'atlas cartographique des résultats.

Les zones à fort enjeu biodiversité et fort impact de la pollution lumineuse sont situées à l'est de Paris ainsi que sur les marges ouest de la ville. Plus on s'éloigne de Paris et plus la pollution lumineuse diminue, ainsi le risque pour une zone de fort enjeu biodiversité d'être soumise à une forte pollution lumineuse diminue. Cependant, plusieurs zones peu étendues ont un enjeu critique de biodiversité et pollution lumineuse, comme la base de loisirs de Créteil ou le Parc des Sévines.

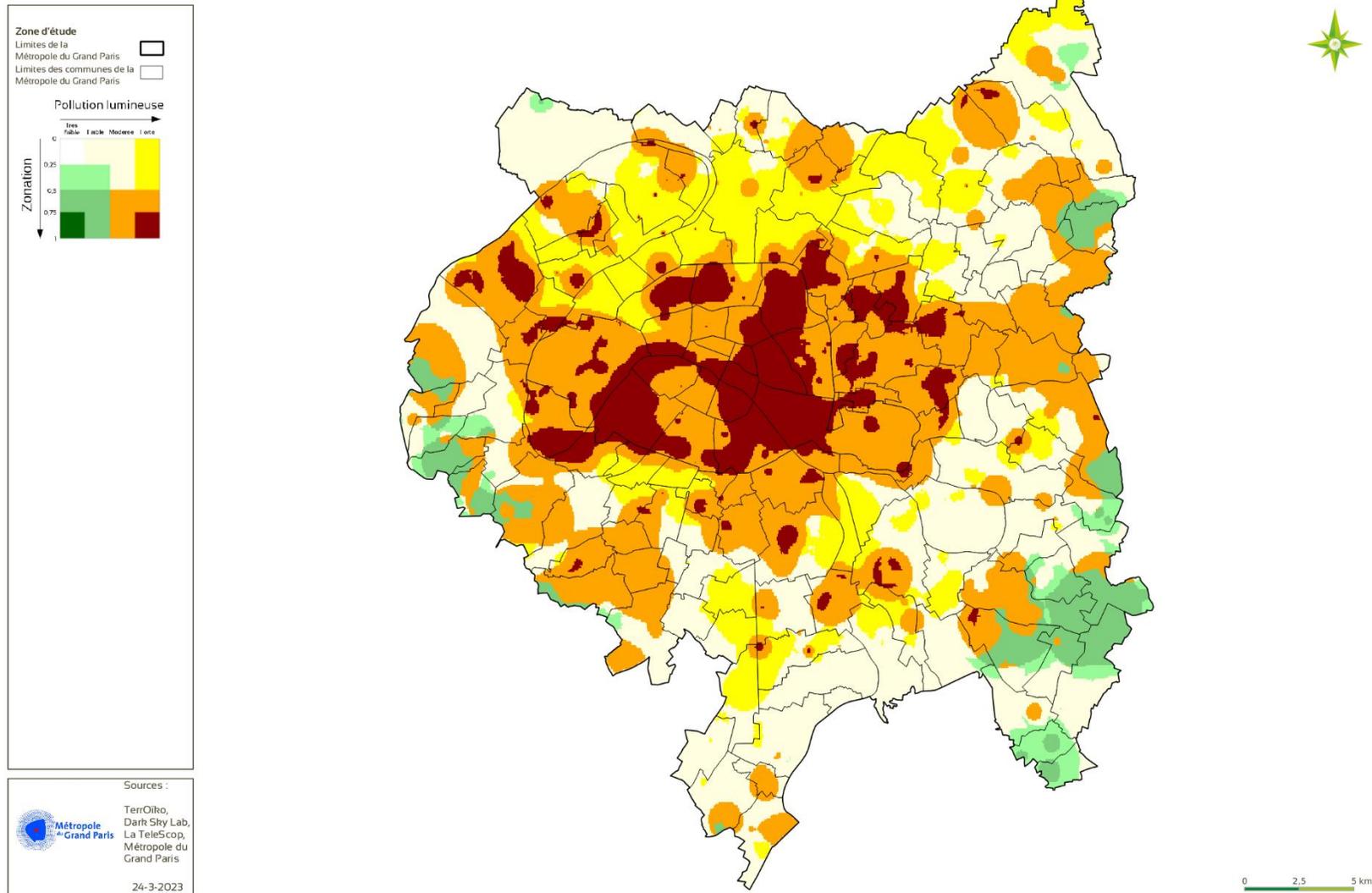


Figure 12. Croisements des résultats de priorisation d'enjeux biodiversité d'après les données d'inventaire, fournis par ZONATION, et la pression liée à la pollution lumineuse diffuse.

## 6. APPROCHE FONCTIONNELLE

### 1. DONNEES UTILISEES

---

Cette approche a pour objectif de rendre compte de l'impact de la pollution lumineuse sur les espèces forestières nocturnes se déplaçant entre les boisements de la Métropole du Grand Paris.

SimOïko permet pour la première fois de **reproduire la vie des espèces sur ordinateur de manière opérationnelle**. Il aborde la totalité des processus écologiques souhaités par les écologues et les services instructeurs. Cette capacité fait de SimOïko un outil adapté à l'analyse de viabilité des populations et à l'analyse de la **fonctionnalité des réseaux écologiques** (Baguette et al. 2013). SimOïko a été adapté pour **intégrer directement l'impact de la pollution lumineuse sur les dynamiques des populations et les mouvements des espèces**. Une description détaillée du modèle ainsi que de son paramétrage est présentée en annexe 2. Les simulations sont effectuées pour la guildes des chiroptères de type pipistrelle et noctule. Elles permettent d'obtenir des estimations de l'impact de la pollution lumineuse sur les tailles et les probabilités de maintien des populations (identification des secteurs où les espèces peuvent accomplir l'intégralité de leur cycle de vie soit l'aspect « réservoirs de biodiversité ») et sur le trafic en individus (identification des secteurs où les espèces peuvent se déplacer entre les réservoirs de biodiversité soit l'aspect « corridors écologiques »)

L'indicateur de pollution lumineuse choisi pour être intégré dans SimOïko pour cette étude est la radiance totale.

### 2. METHODOLOGIE DE CROISEMENT

---

L'impact de la radiance totale sur la vie des espèces est fixé à 10 % lorsque sa valeur est inférieure à  $9 \text{ mW.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ , est linéaire entre 20 % et 98 % lorsque sa valeur est comprise entre 10 et  $50 \text{ mW.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$  (par la formule « valeur de radiance/50 »), et est fixé à 100 % lorsque sa valeur est supérieure à  $50 \text{ mW.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ .

Deux simulations sont effectuées, avec et sans effet de la pollution lumineuse.

Afin d'évaluer l'impact de la pollution lumineuse sur la fonctionnalité des réseaux écologiques, l'indice de fonctionnalité des réservoirs et des corridors sont combinés en un seul indice de fonctionnalité du réseau écologique avec la formule ( $F_{\text{RéseauEcologique}} = F_{\text{Réservoir}} + F_{\text{Corridor}}$ ), avec  $F_{\text{Réservoir}}$  égale à (probabilité de maintien des réservoirs + Taille de population des réservoirs normalisée). La fonctionnalité du territoire est évaluée dans les

deux cas, et la différence entre les deux permet d'évaluer l'impact strict de la pollution lumineuse sur les réseaux écologiques.

### 3. RESULTATS

---

Les résultats obtenus permettent d'évaluer la fonctionnalité du territoire avec et sans l'impact de la radiance totale, et d'évaluer l'impact de cette dernière sur les réseaux écologiques, à partir de la guilda des chiroptères (Figure 13). Les cartes individuelles des résultats sont présentes pp. 80-82 de l'atlas cartographique des résultats.

Les résultats montrent que la pollution lumineuse sur la fonctionnalité des continuités écologiques des espèces nocturnes forestières contraint les déplacements de ces espèces sur l'ensemble du territoire mais sans déstructuration de leurs réseaux écologiques.

Les patchs d'habitats de grande superficie dont les grands boisements que sont les Bois de Boulogne, de Vincennes, et les forêts domaniales de Meudon et de Notre-Dame sont peu impactés par la pollution lumineuse. Celle-ci s'exerçant principalement aux marges de ces boisements, elle a un impact négatif sur leurs tailles de population, mais qui restent suffisantes pour constituer des réservoirs pleinement fonctionnels. Les patchs d'habitats de faible superficie correspondant aux arbres de jardins privés constituent des habitats relais non fonctionnels pour l'espèce, et abritent d'autant moins d'individus qu'ils sont soumis à une forte pollution lumineuse, notamment dans Paris. La pollution lumineuse a également un effet sur les déplacements des chiroptères, réduisant les zones de passage entre est et ouest de part et d'autre de Paris notamment.

La matrice paysagère urbaine et le manque d'habitats favorables restent cependant les deux facteurs prépondérants influençant et contraignant les déplacements de ces espèces. Autrement dit, la pollution lumineuse impose une pression supplémentaire globalement parfois forte sur des secteurs ciblés sans pour autant modifier substantiellement leur occupation du territoire. Les zones les plus impactées sont les abords du Bois de Boulogne et la diagonale entre Saint-Cloud et Rueil-Malmaison, passant par le Parc de Bois Préau jusqu'au Parc des Bords-de-Seine. Les abords du Bois de Vincennes sont également impactés, du côté de Vincennes ainsi que de Joinville-le-Pont et Saint-Maur-des-Fossés. Localement des impacts importants peuvent être constatés, comme au niveau des Jardins des Tuileries et du Trocadéro. Les « impacts positifs » constatés sont très localisés et dus à un report d'individus et de trafic de par l'impact de la radiance totale plus fort sur des zones voisines.

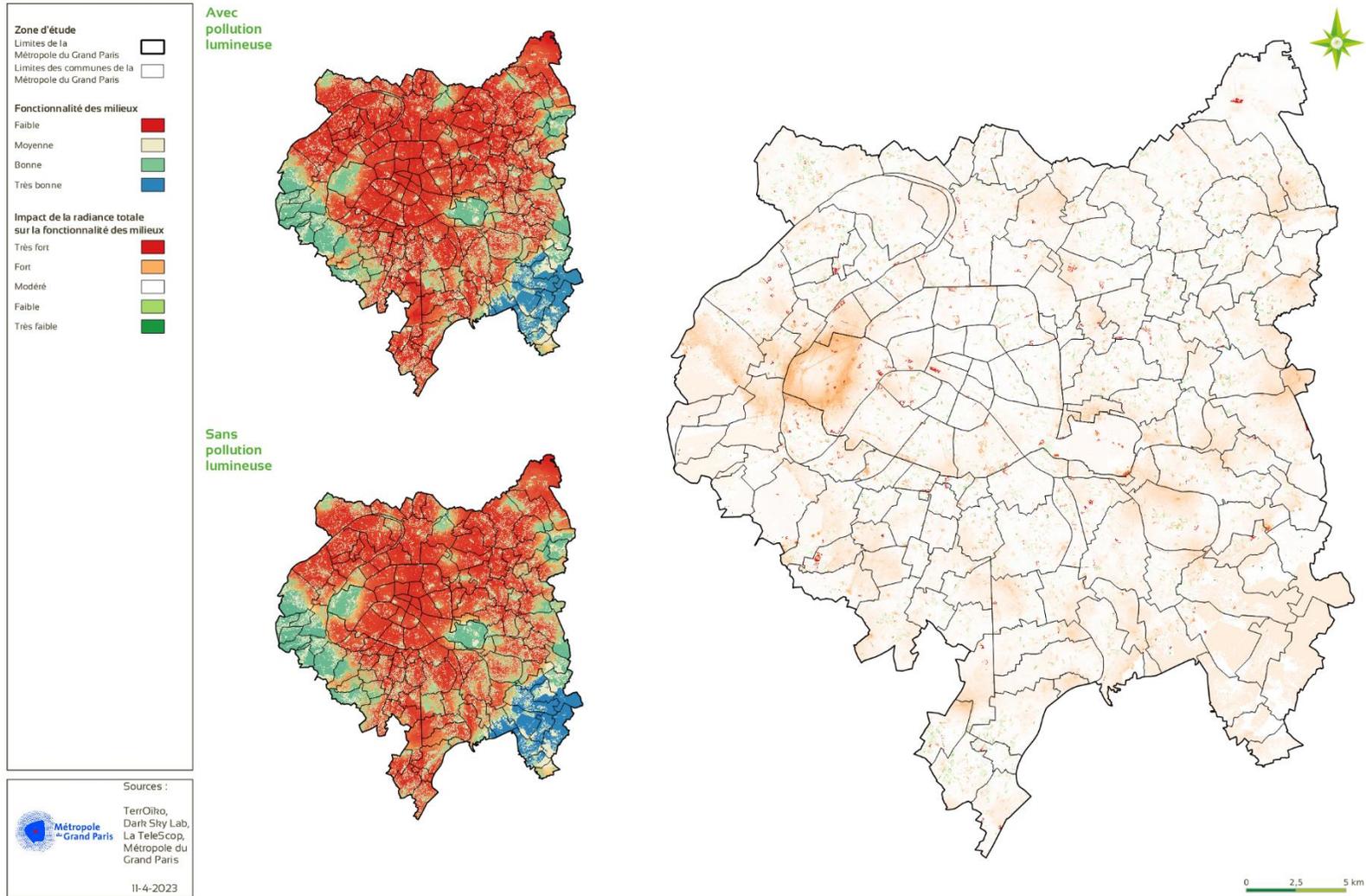


Figure 13 : Impact de la radiance totale sur la fonctionnalité des écosystèmes pour la guilda des chiroptères type pipistrelle et noctule.

## 7. CONCLUSIONS

La Trame Verte et Bleue est un outil d'aménagement du territoire issu du Grenelle de l'Environnement qui vise à concilier développement territorial et conservation de la biodiversité. Le but est d'assurer le maintien et le bon état de conservation de la biodiversité au sens le plus large de ce terme : de la diversité génétique au sein d'une espèce jusqu'au fonctionnement des écosystèmes et des services qu'ils rendent, tout en permettant le développement territorial. Néanmoins, un facteur de pression particulier n'avait que peu été pris en compte jusqu'alors : la pollution lumineuse. Dans ce contexte, et dans le cadre d'une politique plus globale de « reconquête de la nuit », une réponse opérationnelle à l'impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité s'organise autour de la notion de Trame Noire.

La Trame Noire est donc une politique qui vise à prendre en compte l'impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité dans le cadre de la planification territoriale. Plus précisément, il est attendu des collectivités qu'elles identifient, spatialisent dans les documents de planifications territoriales les secteurs du territoire à préserver ou à restaurer au regard de la pollution lumineuse.

Afin d'aider les communes de son territoire à intégrer pleinement l'impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité dans leur outil de planification territoriale, la Métropole du Grand Paris a souhaité disposer de cartographies de la pollution lumineuse et de son impact sur la biodiversité. Dans ce contexte, TerrOïko a valorisé les cartographies de pollution lumineuse établie par DarkSkyLab et La TeleScop en les croisant avec des données structurelles, institutionnelles, et inventoriales, et en les intégrant dans l'outil SimOïko dans une approche fonctionnelle.

L'ensemble des cartes de croisements ont été synthétisées en une seule carte représentant la hiérarchisation des enjeux de pollution lumineuse sur la biodiversité du territoire.

**Des enjeux de pollution lumineuse très forts existent sur la ville de Paris et sa périphérie**, en particulier au niveau des **Bois de Boulogne et de Vincennes**. Plus généralement **la grande majorité des parcs et grands espaces verts** de la Métropole du Grand Paris présentent de forts enjeux liés à la pollution lumineuse, comme le Parc Jean Moulin – Les Guilands, le sud du Parc de la Courneuve, l'extrémité nord de l'Île-Saint-Denis, ou encore le stade municipal Huvier. Les **cours d'eau et milieux humides**, en particulier la Seine, sont aussi concernés par ces niveaux d'impact. Pour rappel, la réglementation impose d'éclairer uniquement la surface où l'éclairage est utile, en faisant attention à ne pas éclairer les abords d'espaces naturels. De plus, l'arrêté du 27 décembre 2018 relatif à la prévention, à la réduction et à la

limitation des nuisances lumineuses, interdit l'éclairage direct des plans d'eau et cours d'eau.

Les **zonages institutionnels** sont grandement impactés par des niveaux de pollution lumineuse fort à très fort, en particulier la **Trame verte de la Métropole du Grand Paris qui est à plus de 89 % touchée** par de la pollution lumineuse forte à très forte. Plus de la moitié de la surface des zonages d'inventaire (ZNIEFF) et plus du tiers des zonages réglementaires sont soumis à une pollution lumineuse forte à très forte, comme plus de la moitié des corridors et des trois-quarts des réservoirs du SRCE.

Seul le cœur **des grands ensembles forestiers à forte valeur patrimoniale reste relativement bien préservé de la pollution lumineuse**, tels que ceux la **Forêt domaniale de Notre-Dame, de Meudon, et de Fausses-Reposes**. Ces ensembles forestiers à forts enjeux de biodiversité doivent donc **être préservés** de la pollution lumineuse qui impacte déjà grandement leurs marges.

Les cartes produites par TerrOïko pour le compte de la Métropole du Grand Paris représentent des supports d'aide à la décision et à la concertation qui peuvent être utilisés par les collectivités pour décliner la Trame Noire à leur échelle. Cette perspective à l'étude est fondamentale pour passer du classement de l'impact de la pollution lumineuse sur la biodiversité à une stratégie de territoire, inscrite dans les documents de planification territoriale, et permettant la mise en place d'une gestion de l'éclairage public adaptée aux usagers et à la préservation de la biodiversité.

## 8. BIBLIOGRAPHIE

- Aulsebrook, A.E., Jones, T.M., Mulder, R.A., Lesku, J.A., 2018. Impacts of artificial light at night on sleep: A review and prospectus. *J. Exp. Zool. Part Ecol. Integr. Physiol.* 329, 409–418.
- Azam, C., Le Viol, I., Julien, J.-F., Bas, Y., Kerbiriou, C., 2016. Disentangling the relative effect of light pollution, impervious surfaces and intensive agriculture on bat activity with a national-scale monitoring program. *Landsc. Ecol.* 31, 2471–2483
- Baguette, M., Blanchet, S., Legrand, D., Stevens, V.M. & Turlure, C. (2013) Individual dispersal, landscape connectivity and ecological networks. *Biological Reviews*, 88, 310-326.
- Bennie, J., Duffy, J., Davies, T., Correa-Cano, M., Gaston, K., 2015. Global Trends in Exposure to Light Pollution in Natural Terrestrial Ecosystems. *Remote Sens.* 7, 2715–2730.
- Bennie, J., Davies, T.W., Cruse, D., Bell, F., Gaston, K.J., 2018. Artificial light at night alters grassland vegetation species composition and phenology. *J. Appl. Ecol.* 55, 442–450.
- Beier, P., 2005. Effects of Artificial Night Lighting on Terrestrial Mammals 24.
- Buchanan, B.W., 2006. Observed and potential effects of artificial night lighting on anuran amphibians.
- Cardinale, B.J., Duffy, J.E., Gonzalez, A., Hooper, D.U., Perrings, C., Venail, P., Narwani, A., Mace, G.M., Tilman, D., Wardle, D.A., Kinzig, A.P., Daily, G.C., Loreau, M., Grace, J.B., Larigauderie, A.,

- Srivastava, D.S. & Naeem, S. (2012) Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486, 59-67.
- de Mazancourt, C., Isbell, F., Larocque, A., Berendse, F., De Luca, E., Grace, J.B., Haegeman, B., Polley, H.W., Roscher, C., Schmid, B., Tilman, D., van Ruijven, J., Weigelt, A., Wilsey, B.J. & Loreau, M. (2013) Predicting ecosystem stability from community composition and biodiversity. *Ecology letters*, 16, 617-625.
- Desouhant, E., Gomes, E., Mondy, N., Amat, I., 2019. Mechanistic, ecological, and evolutionary consequences of artificial light at night for insects: review and prospective. *Entomol. Exp. Appl.* 167, 37–58.
- Dominoni, D.M., Borniger, J.C., Nelson, R.J., 2016. Light at night, clocks and health: from humans to wild organisms. *Biol. Lett.* 12, 20160015.
- Dominoni, D., Smit, J.A.H., Visser, M.E., Halfwerk, W., 2020a. Multisensory pollution: Artificial light at night and anthropogenic noise have interactive effects on activity patterns of great tits (*Parus major*). *Environ. Pollut.* 256, 113314.
- Dominoni, D.M., Kjellberg Jensen, J., Jong, M., Visser, M.E., Spoelstra, K., 2020b. Artificial light at night, in interaction with spring temperature, modulates timing of reproduction in a passerine bird. *Ecol. Appl.* 30.
- Eisenbeis, G., Hänel, A., 2009. Chapter 15. Light pollution and the impact of artificial night lighting on insects. H 20.
- Fagan, W.F. & Holmes, E.E. (2006) Quantifying the extinction vortex. *Ecology letters*, 9, 51-60.
- Fahrig, L. (2003) Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 34, 487-515.
- Fonken, L.K., Nelson, R.J., 2014. The Effects of Light at Night on Circadian Clocks and Metabolism. *Endocr. Rev.* 35, 648–670.
- Frank, K.D., 1988. Impact of outdoor lighting on moths: An assessment
- Gaston, K.J., Davies, T.W., Bennie, J., Hopkins, J., 2012. REVIEW: Reducing the ecological consequences of night-time light pollution: options and developments. *J. Appl. Ecol.* 49, 1256–1266.
- Gaston, K.J., Bennie, J., Davies, T.W., Hopkins, J., 2013. The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal.
- Gaston, K.J., Bennie, J., 2014. Demographic effects of artificial nighttime lighting on animal populations. *Environ. Rev.* 22, 323–330.
- Gaston, K.J., Duffy, J.P., Gaston, S., Bennie, J., Davies, T.W., 2014. Human alteration of natural light cycles: causes and ecological consequences. *Oecologia* 176, 917–931.
- Gaston, K.J., Visser, M.E., Hölker, F., 2015. The biological impacts of artificial light at night: the research challenge. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 370, 20140133.
- Gilpin, M.E. & Soulé, M.E. (1986) Minimum viable populations: processes of extinction. *Conservation Biology: The Science of Security and Diversity* (ed. M.E. Soulé), pp. 19-34. Sinauer Associates, Sunderland.
- Grubisic, M., 2018. When nights are no longer dark: Effects of artificial light at night on agroecosystems. *LED Professional Review*
- Grubisic, M., 2018. Waters under Artificial Lights: Does Light Pollution Matter for Aquatic Primary Producers? *Limnol. Oceanogr. Bull.* 27, 76–81.
- Grubisic, M., van Grunsven, R.H.A., Kyba, C.C.M., Manfrin, A., Hölker, F., 2018. Insect declines and agroecosystems: does light pollution matter?: Insect declines and agroecosystems. *Ann. Appl. Biol.* 173, 180–189.

- Hale, J.D., Fairbrass, A.J., Matthews, T.J., Davies, G., Sadler, J.P., 2015. The ecological impact of city lighting scenarios: exploring gap crossing thresholds for urban bats. *Glob. Change Biol.* 21, 2467–2478.
- Hölker, F., Wolter, C., Perkin, E.K., Tockner, K., 2010. Light pollution as a biodiversity threat. *Trends Ecol. Evol.* 25, 681–682.
- Hopkins, G.R., Gaston, K.J., Visser, M.E., Elgar, M.A., Jones, T.M., 2018. Artificial light at night as a driver of evolution across urban-rural landscapes. *Front. Ecol. Environ.* 16, 472–479.
- Ingvarsson, P.K. (2001) Restoration of genetic variation lost - The genetic rescue hypothesis. *Trends in Ecology & Evolution*, 16, 62-63.
- Kyba, C.C.M., Hölker, F., 2013. Do artificially illuminated skies affect biodiversity in nocturnal landscapes? *Landsc. Ecol.* 28, 1637–1640.
- Legendre, S., Clobert, J., Moller, A.P. & Sorci, G. (1999) Demographic Stochasticity and Social Mating System in the Process of Extinction of Small Populations: The Case of Passerines Introduced to New Zealand. *The American Naturalist*, 153, 449-463.
- Longcore, T., Rich, C., 2004. Ecological light pollution. *Front. Ecol. Environ.* 2, 191–198.
- Macgregor, C.J., Pocock, M.J.O., Fox, R., Evans, D.M., 2015. Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of light pollution: a review. *Ecol. Entomol.* 40, 187–198.
- Mathews, F., Roche, N., Aughney, T., Jones, N., Day, J., Baker, J., Langton, S., 2015. Barriers and benefits: implications of artificial night-lighting for the distribution of common bats in Britain and Ireland. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 370, 20140124.
- Millenium Ecosystem Assessment (2005) Biodiversity Synthesis. Ecosystem and Human Well-being (ed. World Ressource Institute).
- Montevecchi, W., 2006. Influences of artificial light on marine birds.
- Moulherat S. 2014. Toward the development of predictive systems ecology modeling : metaConnect and its use as an innovative modeling platform in theoretical and applied fields of ecological research. sous la direction de Jean Clobert et de Alexis Chainé . - Toulouse 3
- Musters, C.J.M., Snelder, D.J., Vos, P., 2009. The effects of coloured light on nature 43.
- Nathan, R., Getz, W.M., Revilla, E., Holyoak, M., Kadmon, R., Saltz, D., Smouse, P.E., 2008. A movement ecology paradigm for unifying organismal movement research. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 105, 19052–19059.
- Navara, K.J., Nelson, R.J., 2007. The dark side of light at night: physiological, epidemiological, and ecological consequences. *J. Pineal Res.* 43, 215–224.
- Ouyang, J.Q., Davies, S., Dominoni, D., 2018. Hormonally mediated effects of artificial light at night on behavior and fitness: linking endocrine mechanisms with function. *J. Exp. Biol.* 221, jeb156893.
- Owens, A.C.S., Lewis, S.M., 2018. The impact of artificial light at night on nocturnal insects: A review and synthesis. *Ecol. Evol.* 8, 11337–11358.
- Perkin, E.K., Hölker, F., Richardson, J.S., Sadler, J.P., Wolter, C., Tockner, K., 2011. The influence of artificial light on stream and riparian ecosystems: questions, challenges, and perspectives. *Ecosphere* 2, art122.
- Perry, G., Buchanan, B.W., Fisher, R.N., Salmon, M., Wise, S.E., 2008. EFFECTS OF ARTIFICIAL NIGHT LIGHTING ON AMPHIBIANS AND REPTILES IN URBAN ENVIRONMENTS 19.
- Reed, J.M., Mills, L.S., Dunning, J.B., Menges, E.S., McKelvey, K.S., Frye, R., Beissinger, S.R., Anstett, M.C. & Miller, P. (2002) Emerging issues in population viability analysis. *Conservation Biology*, 16, 7-19.

- Rowse, E.G., Lewanzik, D., Stone, E.L., Harris, S., Jones, G., 2016. Dark Matters: The Effects of Artificial Lighting on Bats, in: Voigt, C.C., Kingston, T. (Eds.), *Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World*. Springer International Publishing, Cham, pp. 187–213.
- Russart, K.L.G., Nelson, R.J., 2018. Artificial light at night alters behavior in laboratory and wild animals. *J. Exp. Zool. Part Ecol. Integr. Physiol.* 329, 401–408.
- Salmon, M., 2003. Artificial night lighting and sea turtles 7.
- Sanders, D., Gaston, K.J., 2018. How ecological communities respond to artificial light at night. *J. Exp. Zool. Part Ecol. Integr. Physiol.* 329, 394–400.
- Schirmer, A.E., Gallemore, C., Liu, T., Magle, S., DiNello, E., Ahmed, H., Gilday, T., 2019. Mapping behaviorally relevant light pollution levels to improve urban habitat planning. *Sci. Rep.* 9, 11925.
- Sordello, R., Jupille, O., Deutsch, É., Vauclair, S., Salmon-Legagneur, L., Faure, J.-B., 2018. Trame noire : un sujet qui « monte » dans les territoires. *Sci. Eaux Territ.* Numéro 25, 78.
- Stone, E.L., Harris, S., Jones, G., 2015. Impacts of artificial lighting on bats: a review of challenges and solutions. *Mamm. Biol.* 80, 213–219.
- van Grunsven, R.H.A., Creemers, R., Joosten, K., Donners, M., Veenendaal, E.M., 2017. Behaviour of migrating toads under artificial lights differs from other phases of their life cycle. *Amphib.-Reptil.* 38, 49–55.
- Voigt, C.C., Azam, C., Dekker, J., Ferguson, J., Fritze, M., Gazaryan, S., Hölker, F., Jones, G., Leader, N., Lewanzik, D., Limpens, H., Mathews, F., Rydell, J., Schofield, H., Spoelstra, K., Zagamajster, M., 2018. Guidelines for consideration of bats in lighting projects. UNEP/EUROBATS, Bonn.
- Wise, S., 2007. STUDYING THE ECOLOGICAL IMPACTS OF LIGHT POLLUTION ON WILDLIFE: AMPHIBIANS AS MODELS 10.
- Witherington, B.E., 1997. The problem of photopollution for sea turtles and other nocturnal animals 28.

## ANNEXE 1. ZONATION

### SOMMAIRE

1. PRESENTATION DE ZONATION .....	37
2. CONFIGURATION DE ZONATION POUR L'ETUDE.....	38
a. <i>Grandes orientations de configuration</i> .....	38
b. <i>Estimation des capacités de mouvements des espèces</i> .....	40
c. <i>Prise en compte du statut de protection</i> .....	41
d. <i>Prise en compte de la sensibilité à la pollution lumineuse</i> .....	42

### 1. PRESENTATION DE ZONATION

Zonation est un logiciel libre d'accès, développé par le groupe de biologie de la conservation de l'université d'Helsinki et reconnu par les acteurs de la biodiversité. Zonation est un outil d'aide à la décision dans l'identification et la hiérarchisation des zones essentielles à mettre en réserve pour garantir une préservation optimale de la biodiversité à partir des données d'inventaires disponibles sur un territoire. L'intérêt principal d'utiliser Zonation est que ce logiciel est capable de synthétiser par des cartes simples des informations complexes en prenant en compte de multiples espèces.

Zonation intègre les recommandations des documents-cadres TVB et des codes de l'environnement et de l'urbanisme. Par exemple avec Zonation vous pouvez :

- spécifier l'importance de chacune des espèces suivant les documents-cadres TVB (liste rouge IUCN, espèces sensibles à la fragmentation, intérêt local...).
- spécifier les besoins vitaux des espèces en termes d'espace afin d'éviter de préserver des réservoirs de biodiversité trop petits et déconnectés les uns des autres.
- spécifier des informations sur le paysage telles que le coût du foncier ou les zones ne pouvant pas être retenues comme réservoirs de biodiversité telles que les zones où des aménagements urbains sont planifiés. À l'inverse vous pouvez définir des zones à intégrer impérativement aux « réservoirs de biodiversité » tel que les Réserves Naturelles, arrêtés préfectoraux, Natura 2000, ZNIEFF, Cœur de Parc, etc.

Sous sa forme basique, Zonation intègre les localisations des espèces (points d'inventaires), leur statut de protection et leur besoin en espace (domaine vital). L'analyse commence par

la carte complète du territoire. Le logiciel attribue à chaque cellule une valeur dépendant des espèces s'y trouvant (biodiversité), de leur statut de protection (une plus grande valeur est donnée aux espèces à fort statut de protection), et de leur potentiel à permettre de protéger des zones contiguës selon le domaine vital des espèces. Ensuite, l'algorithme procède en retirant itérativement les cellules avec le moins de valeur pour la conservation du paysage. A chaque itération le logiciel recalcule le poids de chaque cellule. L'opération finit lorsqu'il n'y a plus de cellule sur la carte. Enfin, le logiciel synthétise les résultats notamment sur une carte représentant la hiérarchisation des cellules les unes par rapport aux autres. Plus précisément, chaque cellule est qualifiée d'une note variant de 0 à 1 (du plus faible enjeu au plus fort enjeu). Cette note illustre la hiérarchisation emboîtée de la zone d'étude à travers des couleurs qui indiquent la valeur "écologique" des sites :

- rouge vif : les 2 % de la zone d'étude ayant le plus de valeur
- rouge foncé : les 2 à 5 %
- rose : les 5 à 10 %
- jaune : les 10 à 25 %
- bleu : les 25 à 50 %
- bleu foncé : les 50 à 80 %
- noir : les 80 à 100 % (ou les 20 % ayant le moins de valeur)

La carte en format "tif" est fournie, permettant de choisir les niveaux de hiérarchisation et l'échelle de couleurs selon le contexte. La note traduit directement le pourcentage du territoire à protéger pour maximiser la protection de la biodiversité. Ainsi, si vous souhaitez protéger les 1 % du territoire les plus intéressants il suffit de sélectionner l'ensemble des cellules dont la valeur dépasse 0,99. Si vous souhaitez protéger les 10 % du territoire les plus intéressants il suffit de sélectionner l'ensemble des cellules dont la valeur dépasse 0,9.

## 2. CONFIGURATION DE ZONATION POUR L'ÉTUDE

### a. GRANDES ORIENTATIONS DE CONFIGURATION

Dans le cadre de cette étude, Zonation sera utilisé pour hiérarchiser les enjeux sur les réservoirs de biodiversité en valorisant les données d'inventaires disponibles sur la Métropole du Grand Paris. Les données d'inventaires de GéoNat'IdF et de la LPO sont utilisées.

**Dans le cadre de cette étude :**

- Le diagnostic est réalisé **en l'état des connaissances** que nous savons imparfaites (la connaissance absolue en biodiversité n'est pas accessible).

Autrement dit, il ne s'agit de pas de hiérarchiser les enjeux sur les réservoirs de biodiversité dans l'absolu, mais plutôt relativement à nos connaissances. Aussi les résultats de Zonation ne seront pas pris comme le résultat de l'état des enjeux biodiversité du territoire mais plutôt comme une aide à la décision nous permettant d'affiner notre connaissance et de cibler les secteurs où nous pensons qu'elle est lacunaire.

- Nous utilisons l'ensemble des données d'inventaires disponibles, concernant la faune et la flore métropolitaine. En l'état des connaissances scientifiques, nous considérons que la faune diurne est aussi impactée par la pollution lumineuse et donc qu'elle doit être intégrée à l'analyse au même titre que la faune nocturne. De plus, en l'état des connaissances scientifiques il apparaît que l'ensemble des groupes taxonomiques peuvent être impactés.
- Nous utilisons les données d'inventaires disponibles depuis 2010. Cette limite temporelle permet d'avoir un jeu de données suffisant important pour la robustesse de l'analyse tout en excluant des données trop anciennes et donc potentiellement non-informatives pour l'étude.

Les données d'inventaires ont été homogénéisées pour pouvoir prendre en compte les effectifs des espèces observées. Nous avons utilisé l'abondance maximale renseignée ou l'abondance minimale lorsque la première n'était pas renseignée. Lorsqu'aucune valeur n'était renseignée, nous avons considéré l'abondance équivalente à 1. Les données non identifiées à un rang égal ou inférieur à l'espèce ne sont pas utilisées, et les données de rang inférieur à l'espèce sont jointes à celles du rang espèce.

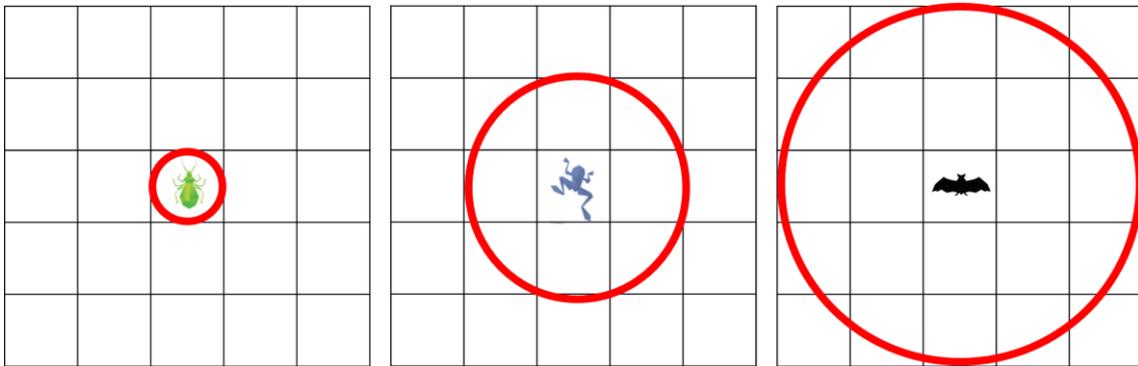
**L'analyse réalisée avec Zonation est conduite en considérant :**

- Une définition du paysage à une échelle de 50 m, permettant d'obtenir des données assez fines à l'échelle du territoire de la Métropole du Grand Paris.
- La fonction qui prend en compte toutes les espèces présentes dans une cellule et donne ainsi plus de poids à la diversité spécifique (Additive benefit function). Elle favorise les zones avec plus de biodiversité par rapport aux zones pouvant être significatives pour l'existence d'une ou deux espèces seulement.
- L'incertitude sur la localisation de l'espèce à travers la prise en compte des capacités de mouvements des espèces. Il s'agit de prendre en compte que l'observation d'une espèce très mobile à un endroit donné ne veut pas dire qu'elle n'utilise pas un secteur plus grand au cours de sa vie.

- Le statut de protection des espèces choisies, à travers les Listes Rouges UICN nationales. Il s'agit de donner plus de poids aux espèces avec un statut de protection plus élevé.
- Leur sensibilité à la pollution lumineuse. Il s'agit de donner plus de poids aux espèces connues pour être plus sensibles à la pollution lumineuse.

b. ESTIMATION DES CAPACITES DE MOUVEMENTS DES ESPECES

La prise en compte des capacités de mouvement des espèces permet d'inclure dans le modèle le fait que l'observation d'une espèce très mobile à un endroit donné ne veut pas dire qu'elle n'utilise pas un secteur plus grand au cours de sa vie. Par exemple, il est attendu qu'une chauve-souris enregistrée à un endroit donné puisse vivre en réalité dans un rayon plus large qu'une grenouille ou qu'un carabe.



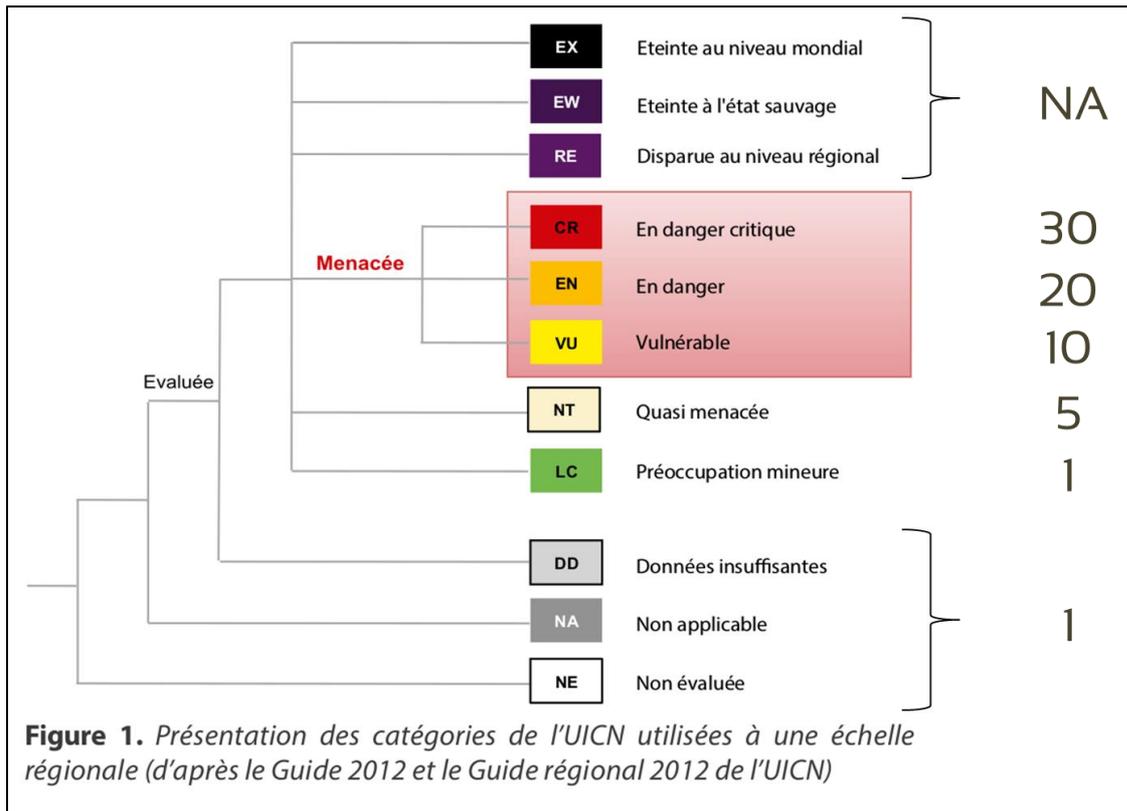
Dans le cadre de cette étude, la prise en compte des capacités de mouvement des espèces se fait au niveau des grands groupes taxonomiques. De plus, nous avons choisi de prendre en compte les capacités de mouvement en dehors des capacités de dispersion. Il s'agit donc d'une estimation centrée sur les mouvements journaliers effectués par les espèces. Nous avons borné les estimations entre 50 et 1 000 mètres.

Grands groupes taxonomiques	Valeur pour le paramétrage (mètres)
Amphibiens anoures	300
Amphibien urodèles	100
Lépidoptères	500
Odonates	500
Orthoptères	100
Autres insectes (Coléoptère, Diptère, Hémiptères, Hyménoptères, Mantoptère, Mécoptère, Névroptère, Ephéméroptère, Mégaloptère, Plécoptère, Trichoptère)	100

Mammifères (hors chiroptères)	500
Chiroptères	1000
Oiseaux	1000
Poissons	100
Reptiles	100
Annélides	100
Arachnides	100
Crustacés	100
Gastéropodes	100
Mousses	50
Hépatiques et Anthocérotes	50
Autres	50
Lichens	50
Gymnospermes	50
Angiospermes	50
Ptéridophytes	50
Chlorophytes et Charophytes	50

#### c. PRISE EN COMPTE DU STATUT DE PROTECTION

Il s'agit de donner plus de poids aux espèces avec un statut de protection plus élevé. Nous proposons d'utiliser la Liste Rouge UICN nationale avec la pondération définie dans le tableau ci-dessous.



d. PRISE EN COMPTE DE LA SENSIBILITE A LA POLLUTION LUMINEUSE

Il s'agit de donner plus de poids aux espèces connues pour être plus sensibles à la pollution lumineuse. Il est à noter qu'il est difficile d'établir un tel classement à la lecture des nombreux articles sur l'impact de la pollution lumineuse sur la vie des espèces. En effet, il semblerait que l'ensemble des espèces puissent être sensibles à la pollution lumineuse. De plus, les avis des experts divergent fortement sur la question. Aussi, notre proposition repose plus sur un classement relatif des grands groupes d'espèces d'après les données disponibles dans la littérature scientifique sur l'impact de la pollution lumineuse sur les traits d'histoire de vie des espèces.

Tableau. Classement relatif de la sensibilité des grands groupes d'espèces à la pollution lumineuse et ses impacts sur leurs traits d'histoire de vie

	Très forte	Forte	Modérée	Faible ou peu connue	Très faible ou inconnue
<b>Valeurs</b>	5	4	3	2	1
<b>Groupes taxonomiques</b>	Hétérocères Chiroptères	Mammifères (hors chiroptères)	Oiseaux, Autres insectes (Coléoptère,	Amphibien urodèles, Reptiles	Rhopalocères Odonates

		Amphibiens anoures	Diptère, Hémiptères, Hyménoptères, Mantoptère, Mécoptère, Névroptère, Ephéméroptère, Mégaloptère, Plécoptère, Trichoptère) Poissons Gastéropodes Araignées		Orthoptères Annélides Crustacés Plantes
--	--	-----------------------	--	--	--

## ANNEXE 2. SIMOÏKO

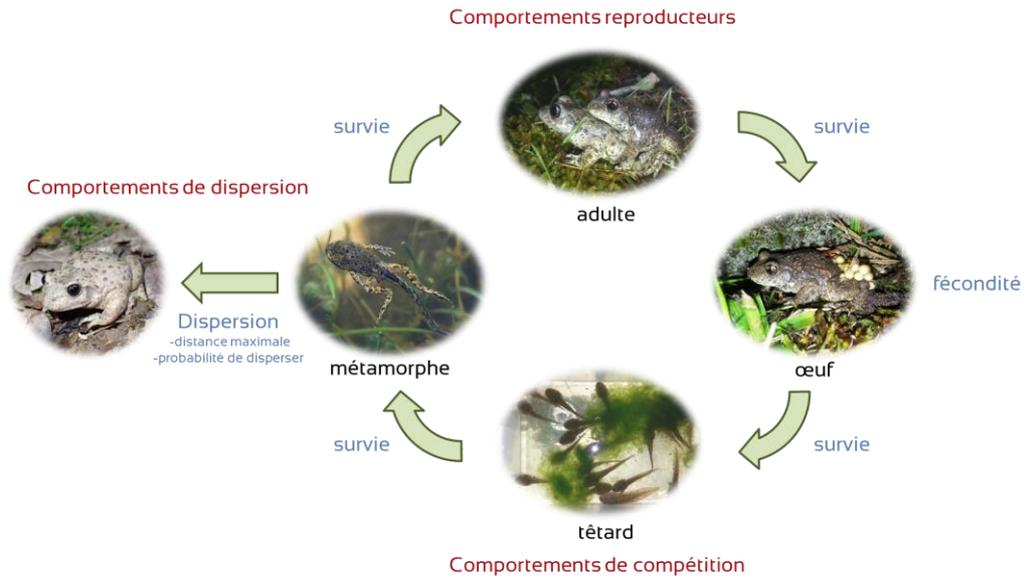
### SOMMAIRE

1.	BASES CONCEPTUELLES DU FONCTIONNEMENT DE SIMOÏKO .....	44
2.	INTEGRATION DE LA POLLUTION LUMINEUSE DANS SIMOÏKO POUR LA TRAME NOIRE.....	47
	a. <i>Implémenter l'effet de la pollution lumineuse sur la vie des espèces pour le diagnostic trame noire</i> .....	47
	b. <i>Sources de données disponibles pour modéliser l'impact de la pollution lumineuse sur la vie des espèces</i> .....	48
	c. <i>Impacts sur les capacités biotiques des habitats</i> .....	50
	d. <i>Impact sur les coefficients de friction</i> .....	52
3.	PRESENTATION DES DONNEES NECESSAIRES A L'UTILISATION DE SIMOÏKO .....	55
	a. <i>Choix des espèces ou guildes d'espèces à simuler</i> .....	55
	b. <i>Occupation du sol</i> .....	55
	c. <i>Cartographie de la pollution lumineuse</i> .....	57
4.	PARAMETRAGE DE LA GUILDE D'ESPECES POUR SIMOÏKO .....	59

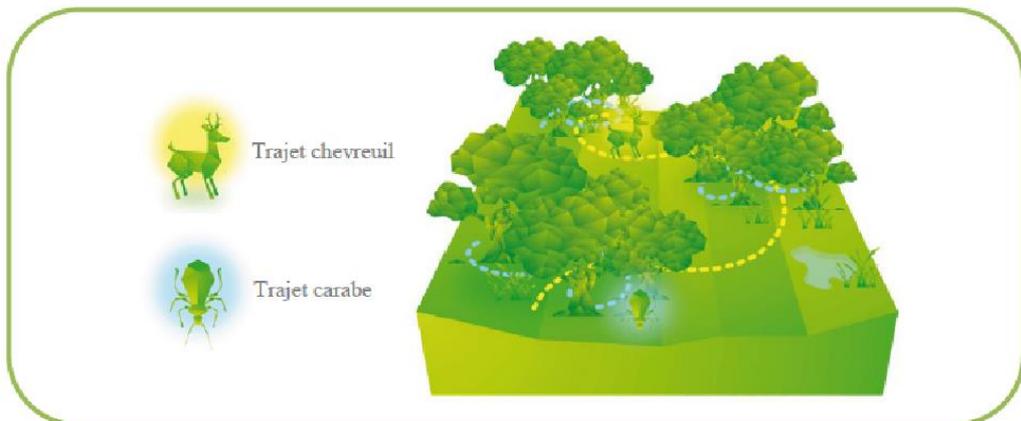
### 1. BASES CONCEPTUELLES DU FONCTIONNEMENT DE SIMOÏKO

SimOïko permet pour la première fois de **reproduire la vie des espèces sur ordinateur de manière opérationnelle**. Il valorise les travaux de recherche issus de plusieurs projets nationaux et européens concernant le fonctionnement des métapopulations animales et végétales (ANR : Mobigène, DIAMES, Projets européens : FP6 TenLAMAS et FP7 SCALES). Il fait partie de la famille des modèles des dynamiques de métapopulations individu centré et spatialement explicite (Moulherat, 2014) :

- **Individu centré** car le cycle de vie de chacun des individus d'une population est modélisé dans son intégralité ce qui permet de prendre en compte la variabilité qu'il peut exister entre deux individus.



- **Spatialement explicite** car les simulations se déroulent sur des paysages numérisés au sein desquels les affinités des espèces avec les différents milieux naturels sont reproduites.

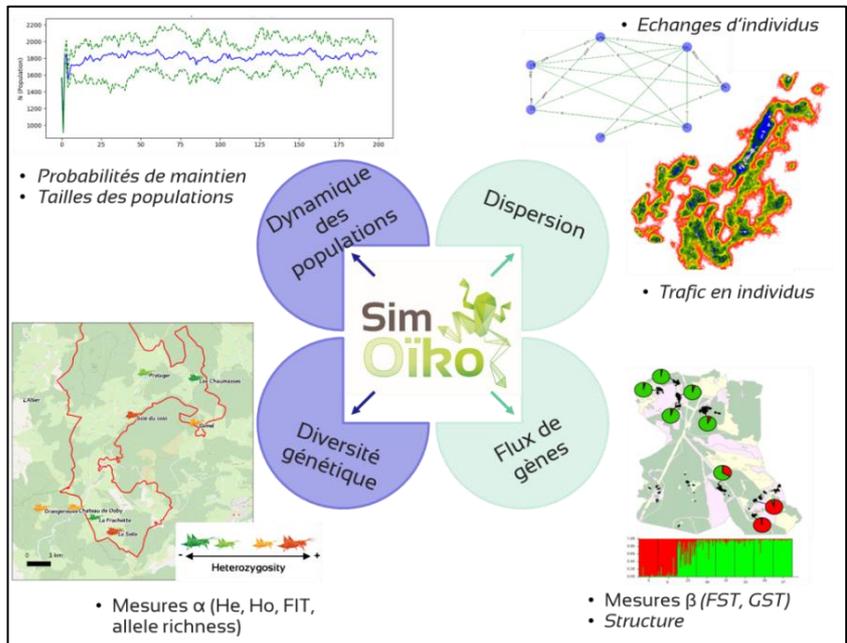
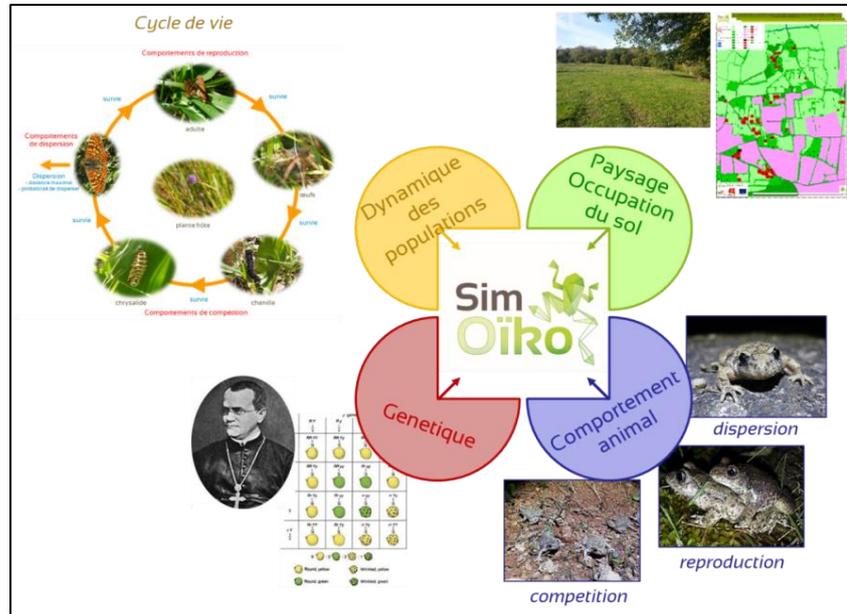


Contrairement aux autres méthodes de modélisation (graphes paysagers, biodispersal, circuitscapes...) SimOïko **aborde la totalité des processus écologiques souhaités par les écologues et les services instructeurs**. Cette capacité fait de SimOïko un outil adapté à l'analyse de **viabilité des populations** et à l'analyse de la **fonctionnalité des réseaux écologiques** (Baguette et al. 2013).

SimOïko intègre les données de la littérature scientifique et les avis des experts sur les **dynamiques des populations**, le paysage, la génétique et les **comportements des espèces** (dispersion, reproduction, compétition).

En retour, SimOïko fournit des estimations sur **les probabilités d'extinctions** et le **trafic en individus sur un territoire**. SimOïko fournit également d'autres métriques telles que les estimations des tailles des populations, les flux d'individus et de gènes ou le degré de consanguinité des populations.

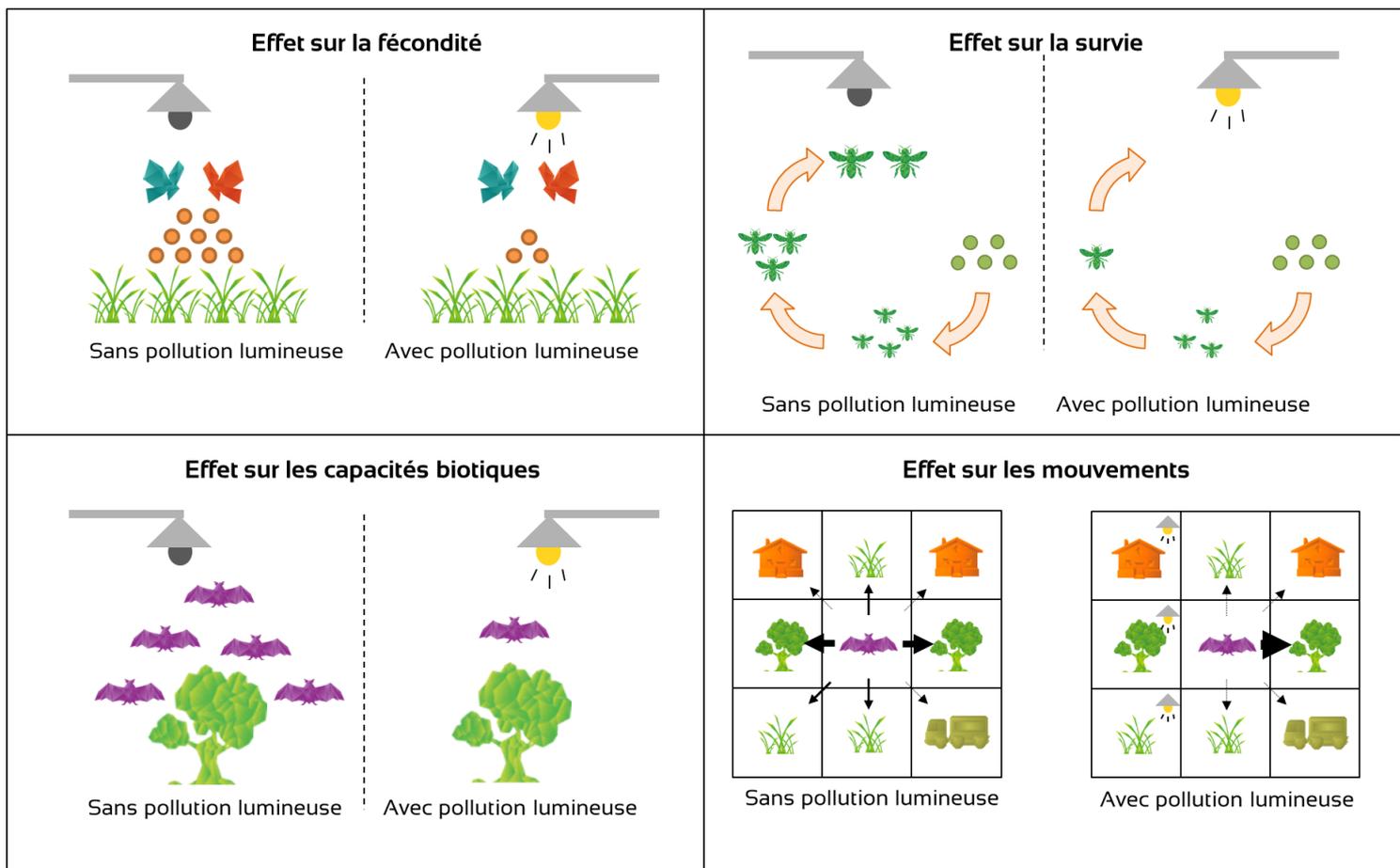
Une description plus approfondie de SimOïko est disponible sur le site [www.simoiko.fr](http://www.simoiko.fr) ou à travers la thèse de Sylvain Moulherat (Moulherat 2014).



## 2. INTEGRATION DE LA POLLUTION LUMINEUSE DANS SIMOÏKO POUR LA TRAME NOIRE

### a. IMPLEMENTER L'EFFET DE LA POLLUTION LUMINEUSE SUR LA VIE DES ESPECES POUR LE DIAGNOSTIC TRAME NOIRE

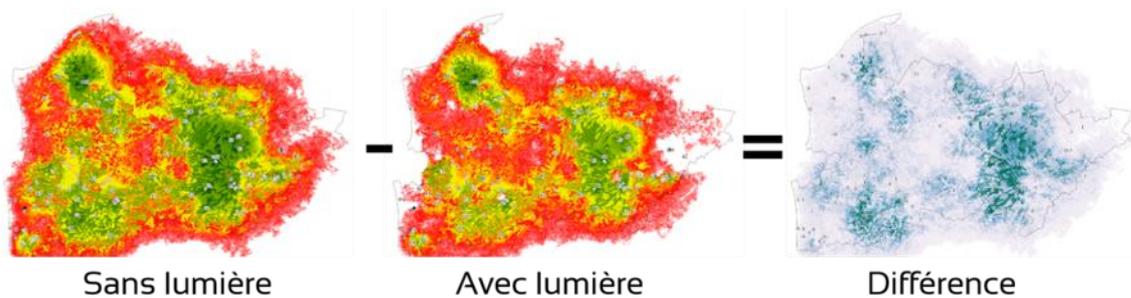
SimOïko a été adapté pour **intégrer directement l'impact de la pollution lumineuse sur les dynamiques des populations et les mouvements des espèces**. Concrètement, une cartographie de la pollution lumineuse est intégrée comme coût supplémentaire pour les espèces ou groupes d'espèces dans leur cycle de vie (diminution de la survie et/ou de fécondité, des capacités biotiques des milieux...) et leur déplacement (évitement des zones trop fortement lumineuses) d'après les **connaissances scientifiques disponibles** et les **avis des experts des territoires**.



*Exemples de processus au travers desquels la pollution lumineuse peut affecter la vie des espèces d'après la littérature scientifique.*

Distinguer l'effet de la pollution lumineuse des autres pressions agissant sur la vie des espèces est crucial pour bien appréhender la trame noire (Azam et al. 2016, Dominoni et al. 2020<sup>a</sup>, Dominoni et al. 2020<sup>b</sup>). Afin de séparer l'**effet strict de la pollution lumineuse** des

**autres pressions** agissant sur les espèces, nous réaliserons pour chaque espèce ou groupe ciblé, des simulations **avec et sans prise en compte de la pollution lumineuse**. Les estimations fournies par SimOïko (probabilités d'extinctions des populations, trafic en individus) dans un état **avec pollution lumineuse** et un état **sans pollution lumineuse** sont comparées pour faire ressortir les secteurs les plus impactés par l'effet strict de la pollution lumineuse. Cela permet d'obtenir des **estimations de l'impact strict de la pollution lumineuse sur la vie des espèces**.



*Exemple de résultats des simulations pour les chauves-souris à l'échelle du Parc Naturel des Caps et Marais d'Opale. Le gradient de couleur représente le trafic en individus sur le territoire (rouge = faible, jaune = modéré, vert = fort).*

Les estimations de l'impact strict de la pollution lumineuse sur la vie des espèces viennent **aider les décideurs à identifier les habitats/écosystèmes/secteurs les plus impactés**. Elles **complètent** les données biodiversité existantes (données de présences, documents stratégiques) et les avis des experts des territoires.

b. SOURCES DE DONNEES DISPONIBLES POUR MODELISER L'IMPACT DE LA POLLUTION LUMINEUSE SUR LA VIE DES ESPECES

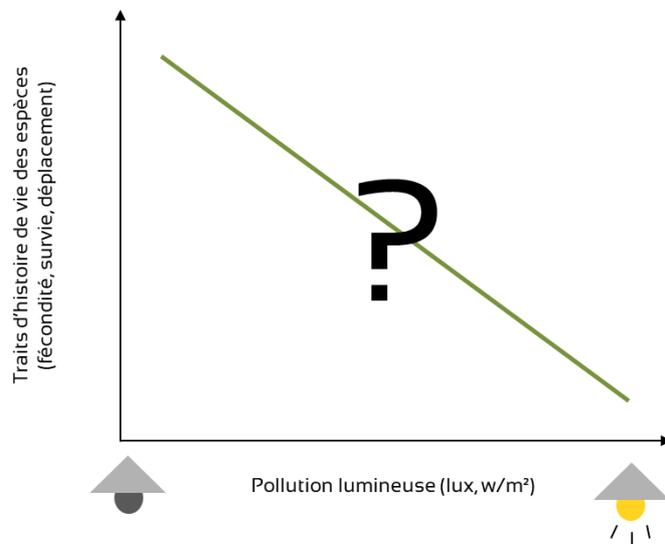
**La pollution lumineuse** peut agir de plusieurs manières sur la vie des espèces (Longcore & Rich 2004, Musters et al. 2009, Gaston et al. 2013, Gaston & Bennie 2014, Gaston et al. 2015, Dominoni et al. 2016). Son effet dépend des espèces, de l'âge et du contexte (Clark et al. 1996, Voigt et al. 2018). Ainsi, en plus des grandes disparités inter et intra espèce, inter et intra individuel, l'effet de la pollution lumineuse sera différent suivant les phases d'activité des espèces (alimentation, dispersion, maternité, communication, âge...). L'ensemble des espèces peuvent être impactées par la lumière qu'elles soient **diurnes** ou **nocturnes**. Les effets peuvent cependant être différents notamment sur l'activité avec une augmentation de l'activité pour les espèces diurnes et une diminution pour les espèces nocturnes soumises à la pression lumineuse (exemple Schirmer et al. 2019).

L'étude de l'impact de la pollution lumineuse sur la vie des espèces a fait l'objet de **nombreuses synthèses** dans la littérature scientifique (**générale** : Musters et al. 2009, Gaston et al. 2012, Russart & Nelson 2018 ; **papillons nocturnes** : Frank 1988, MacGregor et al. 2015 ; **mammifères** : Beier 2006 ; **chiroptères** : Stones et al. 2015, Mathews et al. 2015, Rowse et al. 2016, Voigt et al. 2018 ; **insectes** : Eisenbeis & Hänel 2009, Grubisic et al. 2018, Owen & Lewis 2018, Desouhant et al. 2019 ; **amphibiens** : Buchanan 2006, Wise 2007 ; **amphibiens & reptiles** : Perry et al. 2008 ; **tortues de mer** : Witherington 1997 ; **oiseaux marins** : Montevecchi 2006 ; **agroécosystème** : Grubisic et al. 2018 ; **ripisylve et les cours d'eau** : Perkin et al. 2011 ; **endocrinologie** : Ouyang et al. 2018 ; **plantes** : Bennie et al. 2016 ; **cycle du sommeil** : Fonken & Nelson 2014, Aulsebrook et al. 2018 ; **producteurs primaires** : Grubisic 2018 ; **communautés** : Sanders & Gaston 2018).

En plus de ces synthèses, la littérature scientifique est riche d'articles sur l'**effet de la pollution lumineuse sur les traits d'histoire de vie des espèces** (caractères impliqués dans la reproduction et la survie, dont découle la production et la survie de la descendance). Actuellement, la base de données de TerrOïko compile plus de 300 références significatives sur le sujet. Cette base est actualisée via les outils *Web of Science search* ou <http://alandb.darksky.org>.

Cette large littérature n'efface cependant pas encore les **lacunes existantes** sur la quantification précise des liens entre les traits d'histoires de vie des espèces et la pollution lumineuse (Gaston et al. 2013). C'est pourquoi l'**avis d'expert** est encore largement sollicité pour réaliser le paramétrage de SimOïko.

La pollution lumineuse peut affecter les traits d'histoire de vie des espèces de plusieurs manières (Musters et al. 2009). Elle peut affecter la **fécondité**, la **survie** ou le **système de reproduction** (Gaston et Bennie 2014). De plus, elle peut impacter la probabilité pour un individu de **dispenser** ou bien sa **distance maximale de dispersion** (Gaston et Bennie 2014). Cependant, la littérature donne actuellement encore peu d'information et les premiers résultats sont très contrastés sur ces paramètres (synthèse bibliographique TerrOïko).



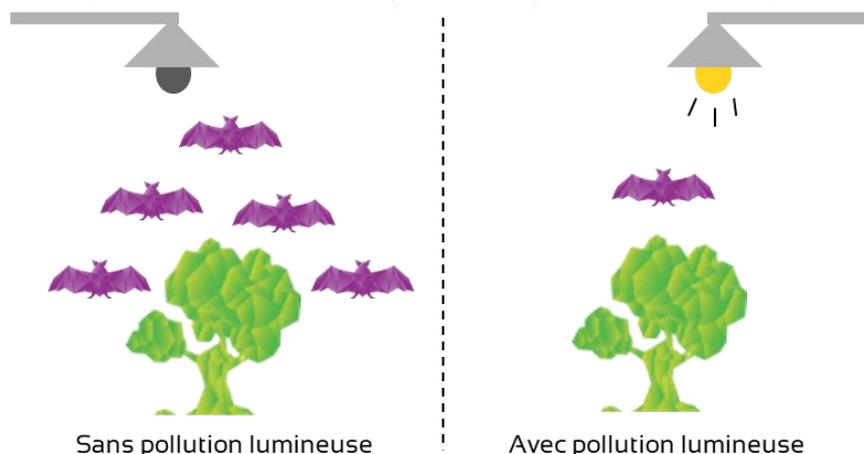
Bien que SimOïko puisse techniquement intégrer l'effet de la pollution lumineuse sur les **survies individuelles**, la **fécondité**, le **pourcentage de dispersant** ou les **capacités maximales**

**de dispersion**, les données de la littérature scientifique ne sont pas assez robustes pour le faire à l'échelle du territoire d'étude.

Les résultats de la littérature scientifique les plus utilisables dans le cadre d'une déclinaison opérationnelle de la trame noire concernent l'impact de la pollution lumineuse sur les **capacités biotiques des habitats** et les **coefficients de frictions**. Elles sont encore très partielles mais donnent un cadre conceptuel intéressant pour appréhender l'impact de la pollution lumineuse sur les espèces.

### C. IMPACTS SUR LES CAPACITES BIOTIQUES DES HABITATS

En absence totale de **compétition** ou de contrainte, les espèces ont une croissance exponentielle, c'est-à-dire qu'elles croissent indéfiniment. La compétition pour les ressources (**habitat**, **alimentation**, **reproduction**) limite la croissance des populations principalement en diminuant la **survie individuelle**, la **fécondité** ou le **recrutement** (ajout de nouveaux individus à une population ou une partie de celle-ci par la reproduction, l'immigration et le repeuplement). La **capacité biotique** (ou capacité de charge ou d'accueil) d'un habitat représente la taille maximale de la population d'une espèce qu'un milieu peut supporter. La capacité biotique est connue pour varier suivant la **qualité du milieu**, la disponibilité en **ressource alimentaire**, la présence de **prédateur** ou de **parasite**.



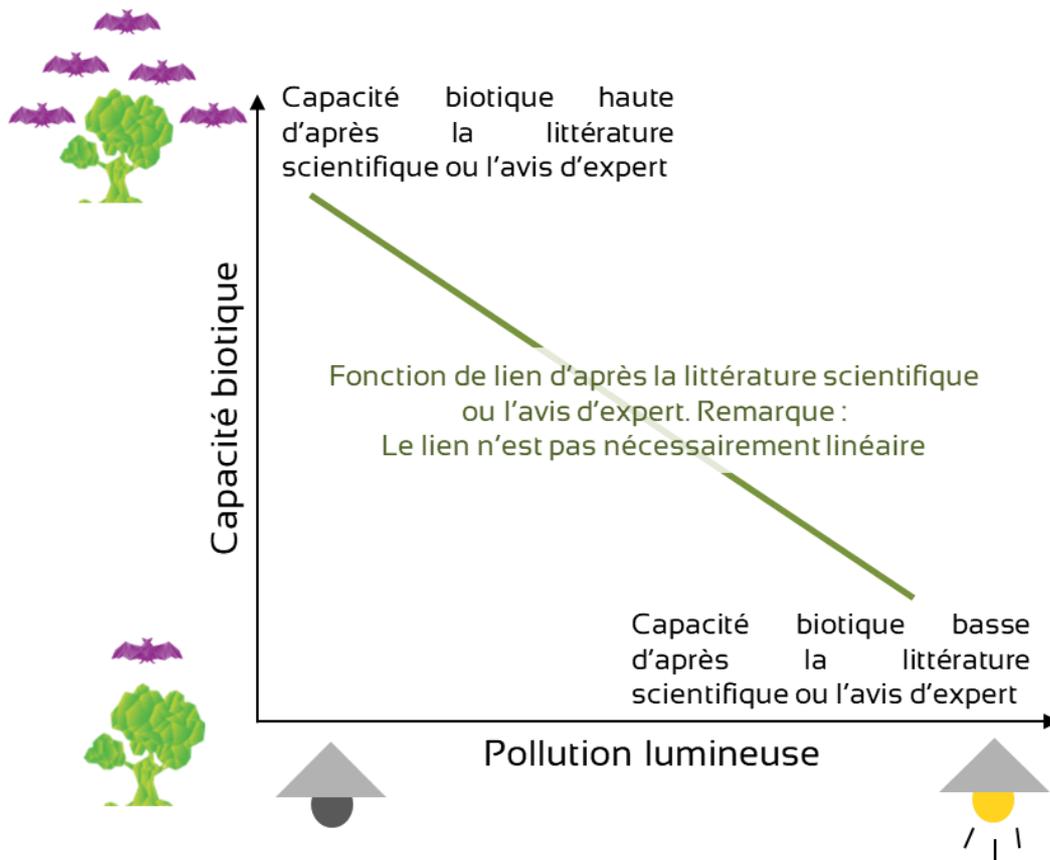
*Illustration de la notion de capacité biotique du milieu et du potentiel effet de la pollution lumineuse.*

D'une manière générale, la littérature scientifique apporte des **preuves indirectes de l'effet de la pollution lumineuse sur la capacité biotique des habitats**.

- Les données utilisables pour évaluer l'effet de la pollution lumineuse sur la capacité biotique des habitats sont classiquement les **probabilités de présence**,

**les densités-activités ou les abondances** des espèces dans leurs habitats de vie.

- La **capacité biotique** est également connue pour varier suivant la **ressource alimentaire**, la présence de **partenaires sexuels**, la présence de **prédateur** ou de **parasite**. La capacité biotique a des conséquences directes sur le **taux de compétition** entre les individus et donc sur la **survie** ou **l'accès à la reproduction** des individus. Les estimations des paramètres de **survie**, de **reproduction**, de **disponibilité alimentaire** ou de **prédation/parasitisme** peuvent donc indirectement renseigner sur la capacité biotique d'un milieu.

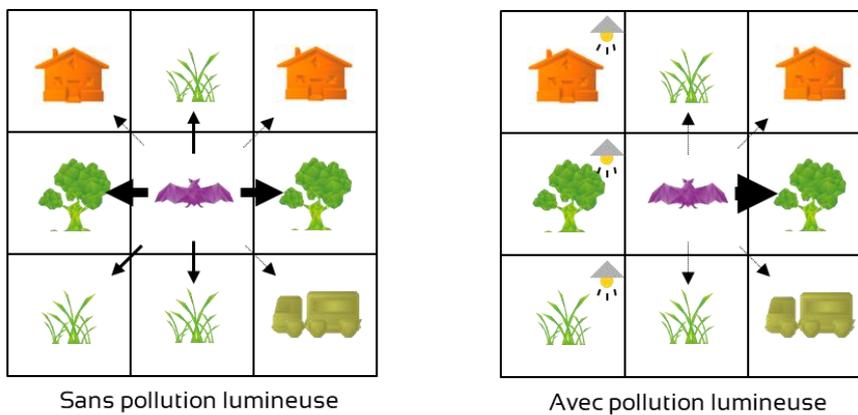


SimOïko intègre dans son paramétrage la **capacité biotique** des habitats via le **taux de compétition** entre les individus. Concrètement, les capacités biotiques sont pondérées par la mesure de la pollution lumineuse. Ainsi, un habitat peu soumis à la pression lumineuse aura des capacités biotiques supérieures à un habitat fortement soumis à la pression lumineuse. La fonction de lien est spécifique à chaque espèce et est dans la mesure du possible tirée de la littérature scientifique.

d. IMPACT SUR LES COEFFICIENTS DE FRICTION

Les déplacements des individus sur un territoire sont **contraints par les éléments paysagés**. Cette contrainte peut être d'ordre physique comme par exemple l'impossibilité pour un chevreuil de passer par-dessus une habitation. Elle peut être également comportementale par exemple la propension à longer les lisières par les chauves-souris alors qu'elles ont les capacités physiques de franchir les milieux totalement ouverts.

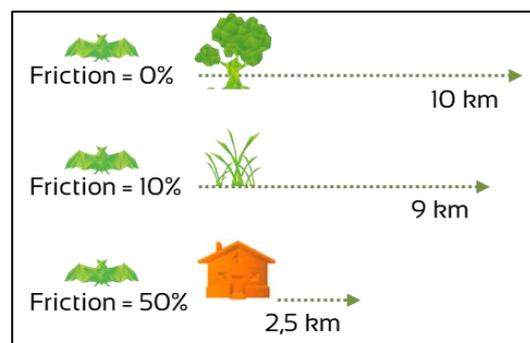
La prise en compte des **impacts des éléments paysagés sur les déplacements** des espèces peut être réalisée à travers l'établissement de **coefficients de friction** (appelés aussi coefficients de friction ou de rugosité). Les coefficients traduisent la **capacité d'une espèce à se déplacer dans les différents types d'habitats d'un paysage**.

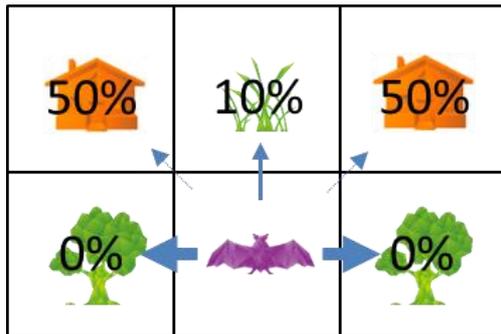


Dans le cadre de cette étude, la méthode de calcul des coefficients de friction est abordée en utilisant les algorithmes de « **simulation des mouvements stochastiques** » (Palmer et al. 2011).

Concrètement, chaque typologie de l'habitat se voit affectée un **coefficient de friction** en termes de pourcentage de réduction des capacités de déplacements de l'espèce dans le milieu par rapport à sa capacité maximale de dispersion.

Ainsi, une espèce dont la distance maximale parcourable est de 10 km pourra parcourir au maximum 10 km dans un milieu de friction = 0 %, 9 km dans un milieu de friction = 10 %, 5 km dans un milieu de friction = 50 %, 1 km dans un milieu de friction = 90 % et 0 km dans un milieu de friction = 100 %.





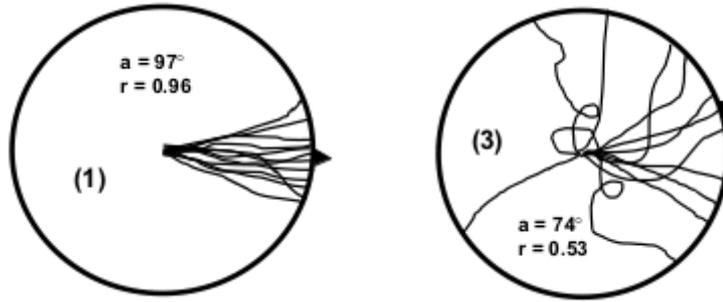
Il est à noter que le coefficient de friction s'interprète également en termes de **comportement des espèces à l'interface entre plusieurs milieux**. Ainsi, un individu aura une plus forte probabilité de passer dans un milieu de friction = 0 % si le milieu adjacent est de friction 50 % plutôt que si ce milieu adjacent est de friction 10 %.

La littérature scientifique est riche d'exemples d'effet **d'attraction, neutre** ou de **répulsion** de la lumière sur les mouvements des espèces. Cependant, la plus grande difficulté est de distinguer les **différents types de mouvement** (Nathan et al. 2008). Classiquement, il est possible de distinguer les **mouvements journaliers** souvent liés à la quête alimentaire, les **mouvements de migration** et les **mouvements de dispersion** qui entraînent des flux de gènes entre populations. Les mouvements de dispersion sont particulièrement ciblés dans le cadre de la trame verte et bleue. Cependant, à notre connaissance les études sur la pollution lumineuse et les études sur la trame noire se focalisent principalement sur les **mouvements journaliers**.

Il est à noter que la lumière peut avoir un impact différent suivant les types de mouvement. Ceci pourrait expliquer que certains taxons soient tolérants ou attirés par la lumière lors de la quête alimentaire mais que globalement ils sont freinés par elle lors de leur déplacement en dispersion (voir par exemple Azam et al. 2016 sur les chiroptères, van Grunsven et al. 2017 sur le crapaud commun).

D'une manière générale, la littérature scientifique apporte des **preuves indirectes de l'effet de la pollution lumineuse sur les coefficients de friction**.

- Les données utilisables pour évaluer l'effet de la pollution lumineuse sur les coefficients de friction sont classiquement les **probabilités de présence, les densités-activités ou les abondances** des espèces dans la matrice paysagère en dehors de leur habitat de vie (exemple ci-dessous d'après Hale et al. 2015).
- Il existe quelques études sur **les mouvements individuels** qui peuvent servir d'estimation indirecte des coefficients de friction (exemple ci-dessous d'après Salmon 2003 de trajectoires de tortues sans pollution lumineuse (1) et avec pollution lumineuse (3))



Les **coefficients de friction** seront ajustés en fonction de la cartographie de la pollution lumineuse pour chaque espèce ou guildes d'espèces simulées. Concrètement, la pollution lumineuse est ajoutée comme un coût supplémentaire pour les déplacements des espèces.

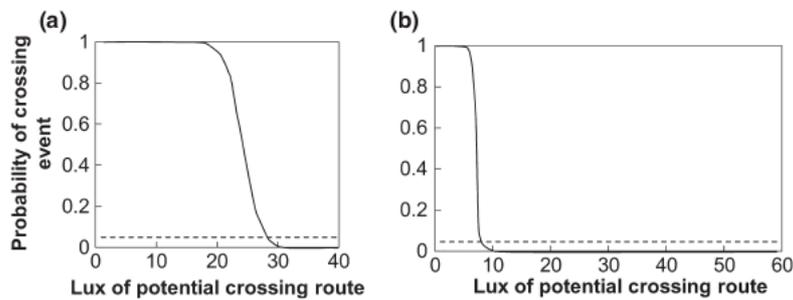
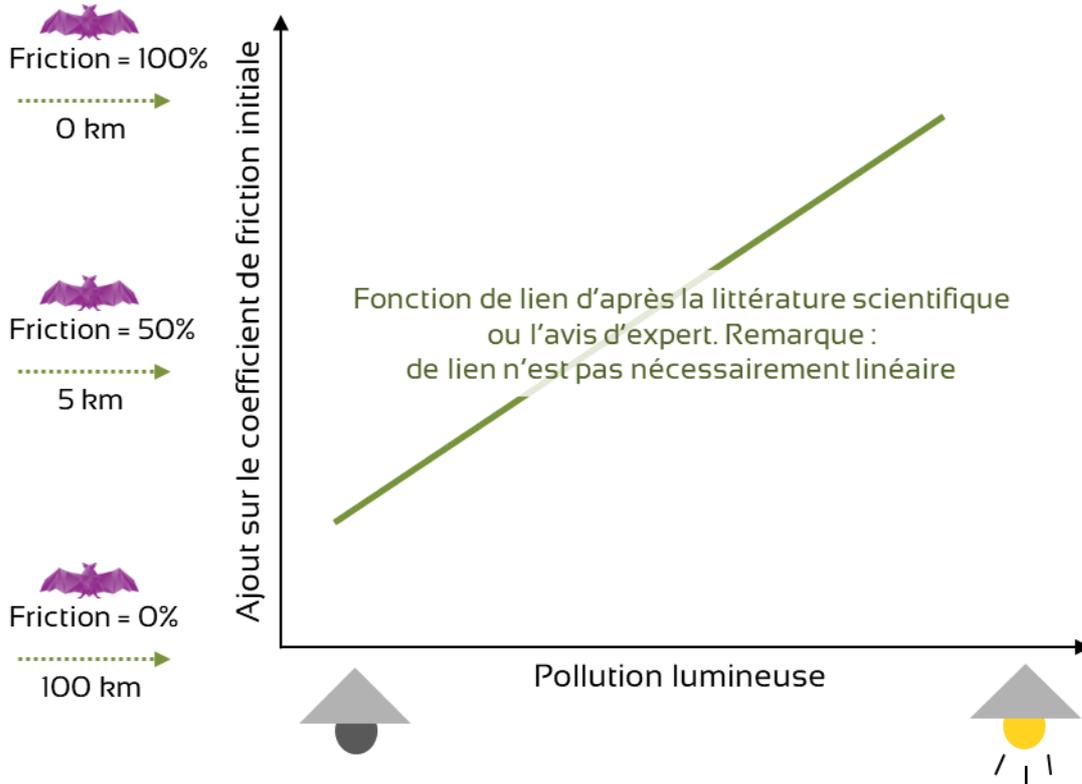


Fig. 3 Examples of binary logistic regression models for the probability of gap crossing by *Pipistrellus pipistrellus* at different lux levels. Models are given for crossing distances of (a) 20–40 m and (b) 60–80 m. The dashed lines indicates where the probability of crossing = 0.05.



### 3. PRESENTATION DES DONNEES NECESSAIRES A L'UTILISATION DE SIMOÏKO

---

Le diagnostic d'une trame noire avec SimOïko nécessite (1) de **choisir les espèces ou guildes d'espèces à simuler**, (2) une **occupation du sol** format shapefile (.shp) décrivant le paysage tel que les espèces le perçoivent, (3) une **cartographie de la pollution lumineuse** format ascii ou tif (.asc, .tif).

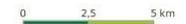
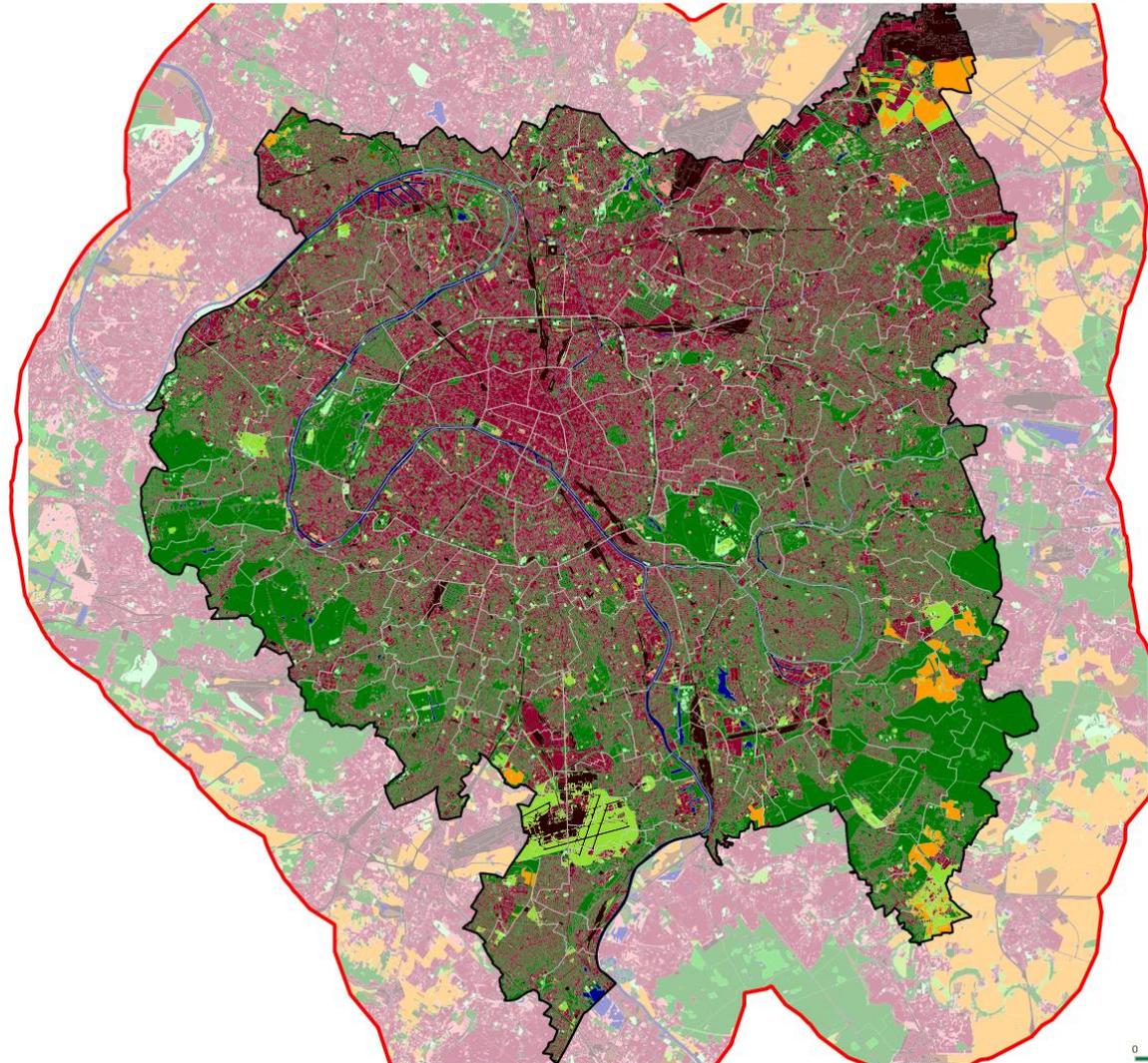
#### a. CHOIX DES ESPECES OU GUILDES D'ESPECES A SIMULER

Il a été décidé que le diagnostic de l'impact de la pollution lumineuse sur la vie des espèces serait réalisé à partir de la guildes des chiroptères type pipistrelle et noctule.

Le choix de cette guildes répond au souhait de couvrir les grands types de milieux et espèces représentatives des enjeux trame noire du territoire.

#### b. OCCUPATION DU SOL

Dans le cadre de cette étude TerrOïko utilise l'**occupation du sol** du territoire d'étude **fournie par la Métropole du Grand Paris, basée sur le MOS 2017**. Ces données sont complétées par les éléments de la trame verte **fournie par Métropole du Grand Paris**. La matrice paysagère décrite permet de rendre compte des milieux où la guildes pourrait potentiellement se déplacer entre les habitats de vie.



## c. CARTOGRAPHIE DE LA POLLUTION LUMINEUSE

Dans le cadre de cette étude, l'acquisition des données de pollution lumineuse a été effectuée par La TeleScop et Dark Sky Lab. L'indicateur de pollution lumineuse choisi pour impacter la guildes des chiroptères dans SimOïko est la radiance totale, qui représente la lumière émise vers le ciel et mesurée par satellites très haute résolution (satellites Jilin), sur l'ensemble du périmètre de la Métropole du Grand Paris, à la maille de 5m.

Les règles de gestion utilisées pour convertir les valeurs de radiance en niveau de pollution lumineuse ambiante sont les suivantes :

- Radiance entre 0 et 9  $\text{mW.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$  => niveau de pollution de 10%, correspondant à des émissions de faible intensité avec un flux canalisé vers le bas sur une surface peu réfléchissante. Ce niveau peut aussi correspondre à des sources masquées en partie par la canopée des arbres
- Radiance entre 10 et 50  $\text{mW.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$  => impact défini de manière linéaire selon la formule « valeur de radiance/50 », soit une valeur entre 20% et 98% de niveau de pollution
- Radiance supérieure à 50  $\text{mW.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$  => niveau de pollution à 100%

Cet indicateur de « pollution lumineuse ambiante » est intégré en tant que pourcentage d'impact de la pollution lumineuse dans la simulation Simoïko.

Communes de la zone d'étude

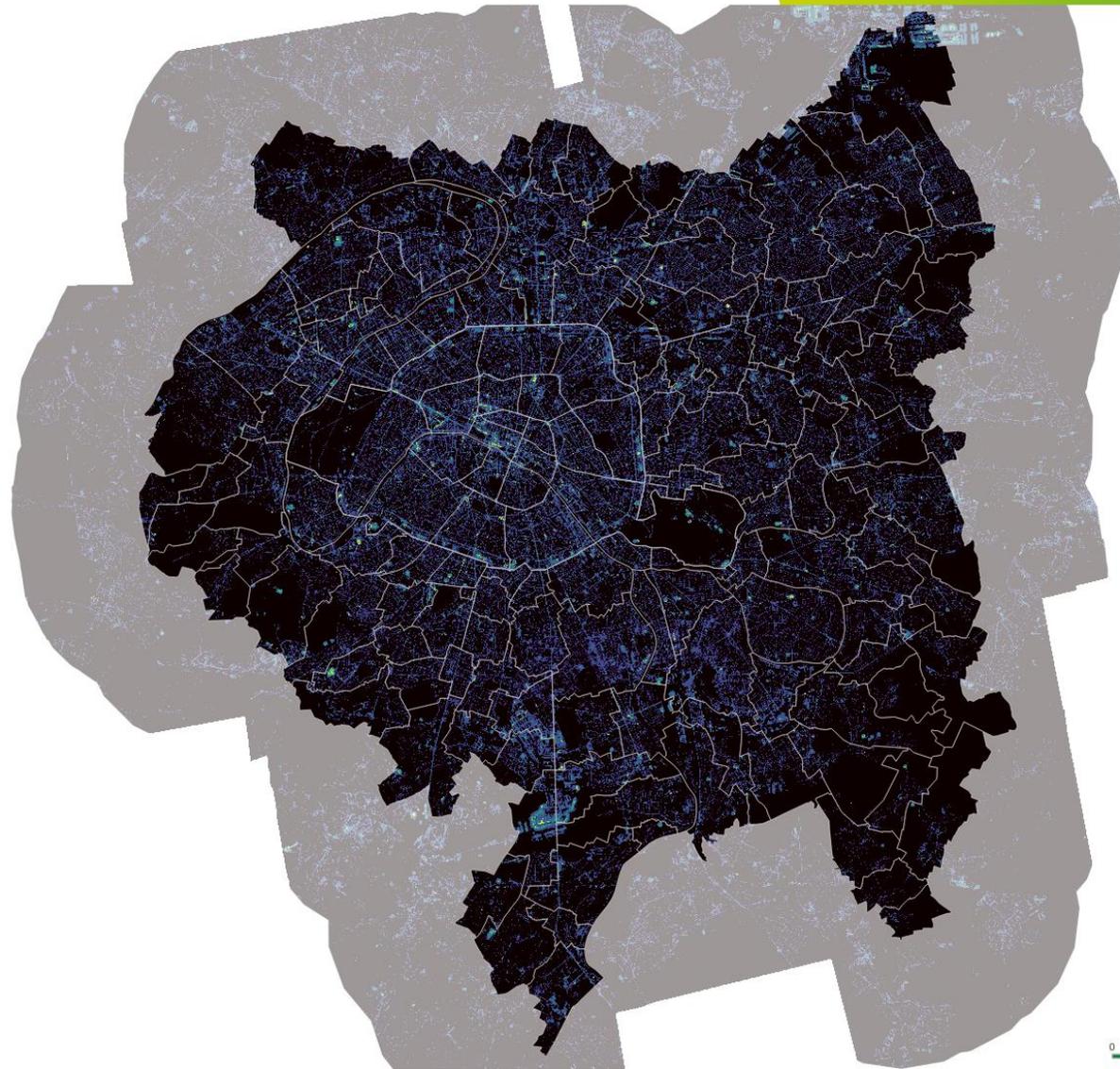
Radiance totale  
(mW.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup>)  
60

1

Sources :

TerrOïko,  
Dark Sky Lab,  
La Telescop,  
Métropole du  
Grand Paris

22-3-2023



## 4. PARAMETRAGE DE LA GUILDE D'ESPECES POUR SIMOïKO

### a. LES CHIROPTERES

La guilda des chiroptères regroupent les chauves-souris les plus souvent contactées sur la zone d'étude d'après les données GéoNat'IdF fournies par la Métropole du Grand Paris. Le groupe ciblé sont les pipistrelles et les noctules mais les résultats restent valables pour une grande partie des chauves-souris (sérotones, murins...).

Cycle de vie	
<p>Les femelles adultes (A) donnent naissance à des petits (F), qui survivent jusqu'à l'année suivante avec une probabilité <math>s_0</math> d'atteindre la classe subadulte. La reproduction des adultes est conditionnée par la compétition entre les individus (<math>g</math>). La fraction (<math>s_1</math>) de subadultes ayant survécu à leurs deux premières années devient des adultes l'année suivante. Une partie des subadultes participe à la dispersion (<math>d_{disp}, d_{max}</math>) et peut ainsi changer de patchs d'habitat. Seule une fraction des adultes survit chaque année (<math>s_2</math>).</p>	
Explication des paramètres	Valeur des paramètres
<p style="text-align: center;"><u>Reproduction</u></p> <p><b>F</b> : fécondité des femelles adultes par année  <b><math>\sigma</math></b> : sexe-ratio</p> <p style="text-align: center;"><u>Installation</u></p> <p>dépendante du patch dans lequel chaque individu est présent ou souhaite s'installer, de par la compétition des autres individus du patch pour l'habitat et les ressources (<math>g</math>)</p> <p style="text-align: center;"><u>Dispersion</u></p> <p><b><math>d_{disp}</math></b> : probabilité de dispersion : probabilité qu'un individu quitte son patch pour s'installer dans un autre patch  <b><math>d_{max}</math></b> : distance maximale parcourable qui correspond à la capacité motrice des individus  <b>Algorithm</b> : algorithme décrivant les choix et trajectoires de dispersion des individus</p> <p style="text-align: center;"><u>Survie</u></p> <p><b><math>s_0</math></b> : survie de la naissance au stade jeune  <b><math>s_1</math></b> : survie des adultes</p>	<p><b>F</b> = 1,25  <b><math>\sigma</math></b> = 1 :1</p> <p><b><math>d_{disp}</math></b> = 15 %  <b><math>d_{max}</math></b> = 100 km                  SMS</p> <p><b><math>s_0</math></b> = 0,79  <b><math>s_1</math></b> = 0,79</p>

<u>Initialisation</u>	
<b>Âge ratio</b> : proportion des subadultes/adultes dans la population au début de la simulation (TerrOïko, références internes)	0,33/0,67
<b>Patchs d'habitat et capacité d'accueil</b>	
Définition des patchs d'habitat de départ en dispersion : les boisements et composites (G, G x E)	
Densité de population dans les patchs (les densités seront adaptées pour répondre au contexte urbain)	0,025 individu/ha
<b>Comportement de dispersion (% de réduction des capacités de dispersion par rapport à l'habitat idéal)</b>	
C1 Eau fermée (étangs, lacs...)	-0 %
C2 Cours d'eau	-0 %
E Prairies ou Ouvert	-0 %
E2.63 Golfs, Hippodromes, Terrains de sport en plein air	-0 %
F Espaces ouverts à végétation arbustive ou herbacée	-0 %
G Bois ou forêts	-0 %
G x E Composite	-0 %
G1.C1 Peupleraies	-0 %
G1.D Vergers d'arbres fruitiers et d'arbres à noix, pépinières	-0 %
G5.1 Berges	-0 %
G5.8 Coupes ou clairières en forêts	-0 %
I1.1 Monocultures intensives, terres labourées	-10 %
I1.2 Cultures mixtes des jardins maraîchers et horticulture	-10 %
J0 Bâti strict, parkings en étage, piscines couvertes	-30 %
J1 Bâtiments des villes et villages	-20 %
J1 Entreposage à l'air libre	-30 %
J1.3 Bâtiments publics des zones urbaines et périphériques	-20 %
J1.3 Grands centres de congrès et d'exposition, mairies, autres équipements de proximité	-30 %
J1.4 Sites industriels et commerciaux en activité des zones urbaines et périphériques	-20 %
J1.4 Grandes surfaces commerciales, autres commerces, grands magasins, bureaux	-30 %
J1.42 Usines des zones urbaines et suburbaines, Electricité	-20 %
J1.6 Chantiers	-20 %
J2 Camping, caravanning	-20 %
J2.43 Cultures intensives sous serres	-20 %
J3 Extraction de matériaux	-40 %

J4 Voies de plus de 25m d'emprise	-50 %
J4.1 Autodromes	-30 %
J4.1 Surfaces engazonnées avec ou sans arbustes	-10 %
J4.1 x E Terrains vacants	-10 %
J4.2 Gares routières, dépôts de bus, Parkings de surface	-30 %
J4.3 Emprises de transport ferré	-30 %
J4.4 Installations aéroportuaires	-30 %
J4.6 Tennis découverts, baignades, parcs d'évolution d'équipements sportifs, Installations sportives couvertes	-30 %
J4.6 x J5 Piscines en plein air	-20 %
J4.7 Cimetières	-30 %
J6 Décharges	-50 %
X16 Semi-ouvert	-10 %
X22 x X23 x X24 x X25 Jardins de l'habitat continu bas, rural, individuel, jardins familiaux, Parcs ou jardins	-10 %

Contact :

Jérémie Cornuau

[jeremie.cornuau@terroiko.fr](mailto:jeremie.cornuau@terroiko.fr)

06 74 03 22 55



La biodiversité dans vos projets