



# POLLUTION LUMINEUSE & BIODIVERSITÉ :

## ENJEUX, IMPACTS, SOLUTIONS



08/10/2021  
Smart Lighting Days

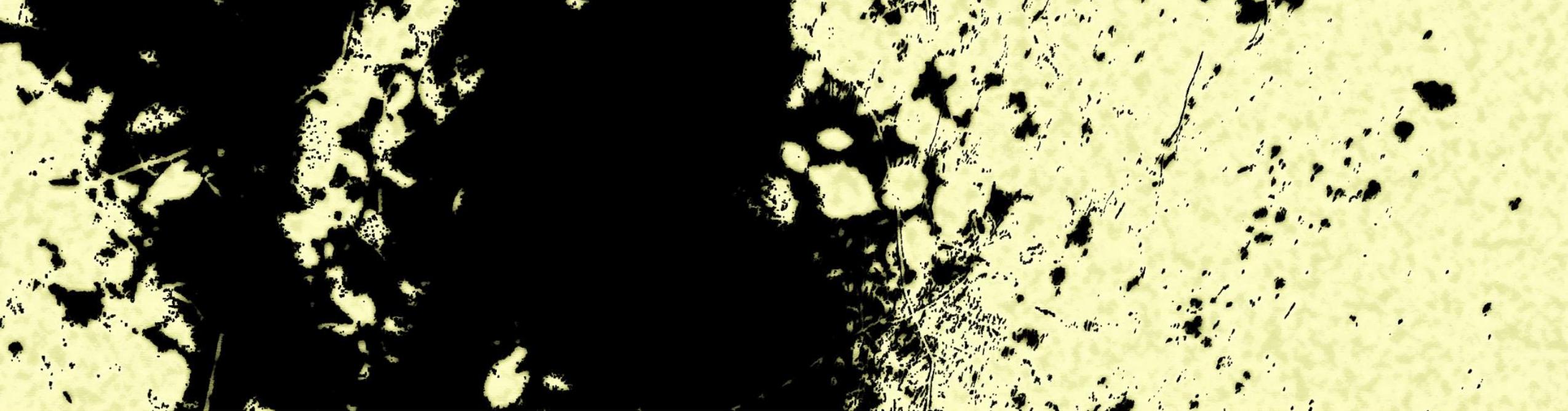
**Romain Sordello**

Expert  
« Trame verte et bleue &  
Pollution lumineuse »



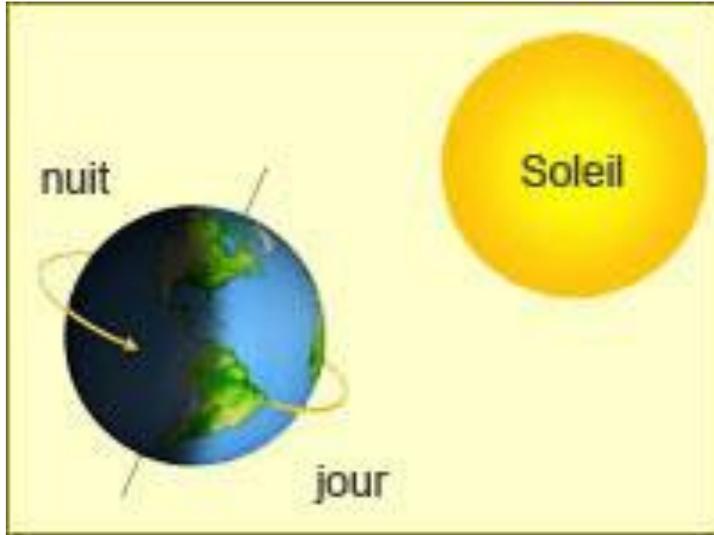
# PLAN DE L'INTERVENTION

1. La biodiversité la nuit
2. Le déploiement de l'éclairage nocturne
3. Les effets de la pollution lumineuse sur la biodiversité
4. Les solutions
5. La Trame noire

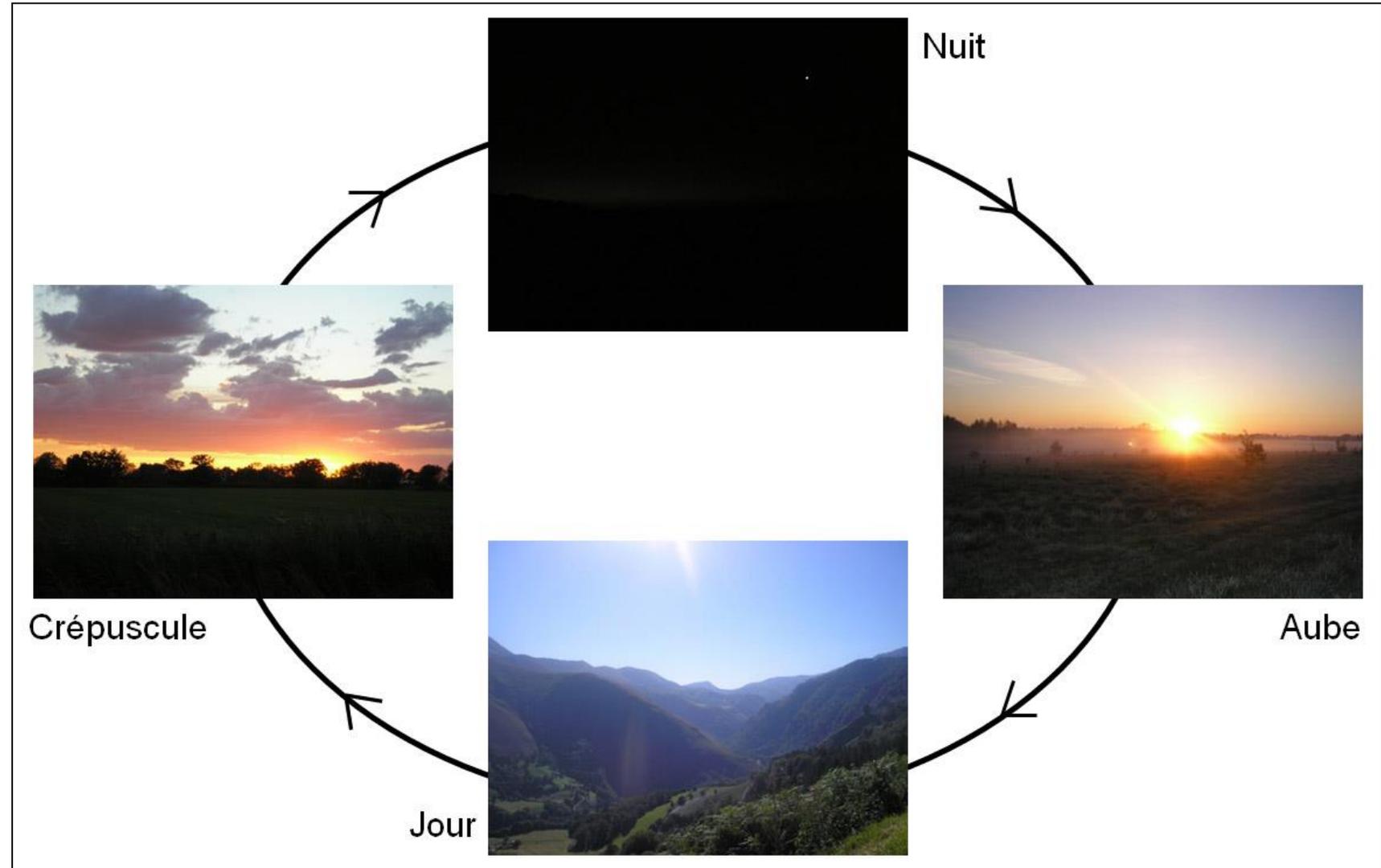


# 1. BIODIVERSITÉ NOCTURNE

# Pourquoi et comment il fait nuit ?



*Une alternance naturelle et continue de jour et de nuit*



# Cette alternance jour/nuit a constitué un paramètre structurant de l'Evolution

# 28 % des vertébrés et # 64 % des invertébrés vivent partiellement ou exclusivement la nuit

**=> La majorité des animaux est nocturne**

*Holker et al. 2010*

# Produire soi-même de la lumière = Bioluminescence



Luciole  
*Luciola lusitanica*

Ex : Oliveira et al. 2015

Pieuvre, *Stauroteuthis syrtensis*

...Pour voir ou communiquer



Ver luisant, *Lampyrus noctiluca* (Photo Yikrazuul)

# Optimiser la lumière naturelle nocturne

Lérot, *Eliomys quercinus*  
Photo Vincent Vignon



=> Adaptations  
biologiques et  
morphologiques,  
comportementales, vision  
infrarouge/ultraviolet

Ex : Veilleux & Cummings 2012



*Tapetum lucidum*

Photo R. Sordello

*Gros yeux placés dans des paraboles*

Photo R. Sordello

# Se repérer la nuit

Ex : Wiltschko et al. 1987



Fauvette des jardins,  
*Sylvia borin*

Photo Steve Garvie

# Utilisation des structures lumineuses (Lune, Constellations, Voie Lactée)

Ex : Mauck et al. 2008



Phoque commun, *Phoca vitulina*

Ex : Dacke et al., 2013



Bousier, *Scarabaeidae*

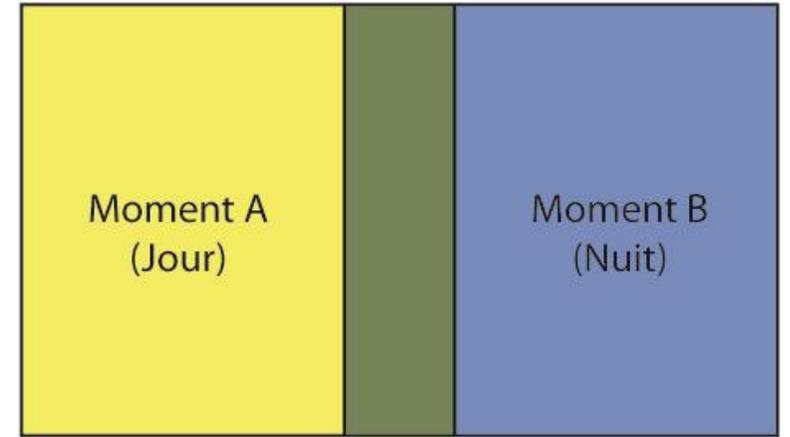
Photo

Photo Olivier Ravayrol

# Nocturne ou crépusculaire ?

⇒ Les chronotones, des moments charnières

Sordello *et al.*, 2014



Moment de transition  
crépuscule ou aube  
(= Chronotone)

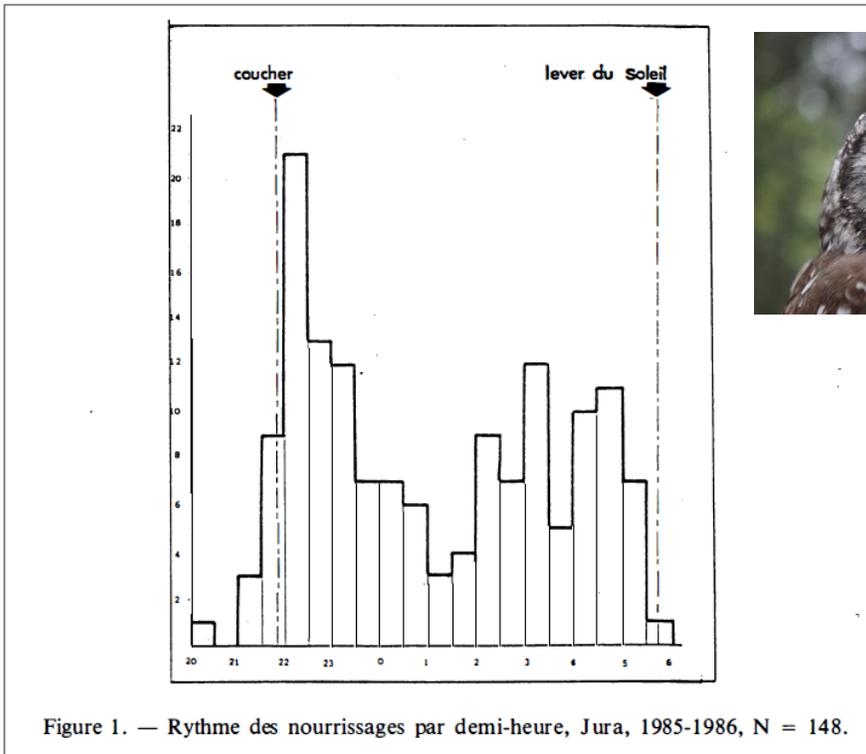
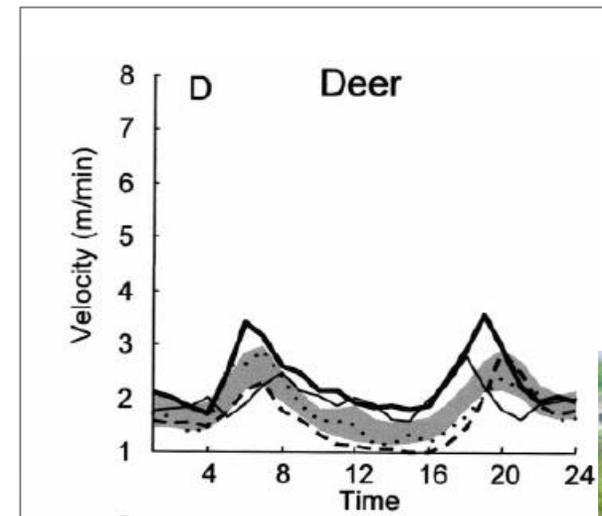


Photo P.A. Ravussin

Profil  
d'activité  
bimodal

**Chouette de Tengmalm *Aegolius funereus***  
Jovenaiaux & Durand, 1985



**Cerf élaphe *Cervus elaphus***  
Ager *et al.*, 2003



Photo P. Gourdain

# *Une sensibilité très fine à la lumière*

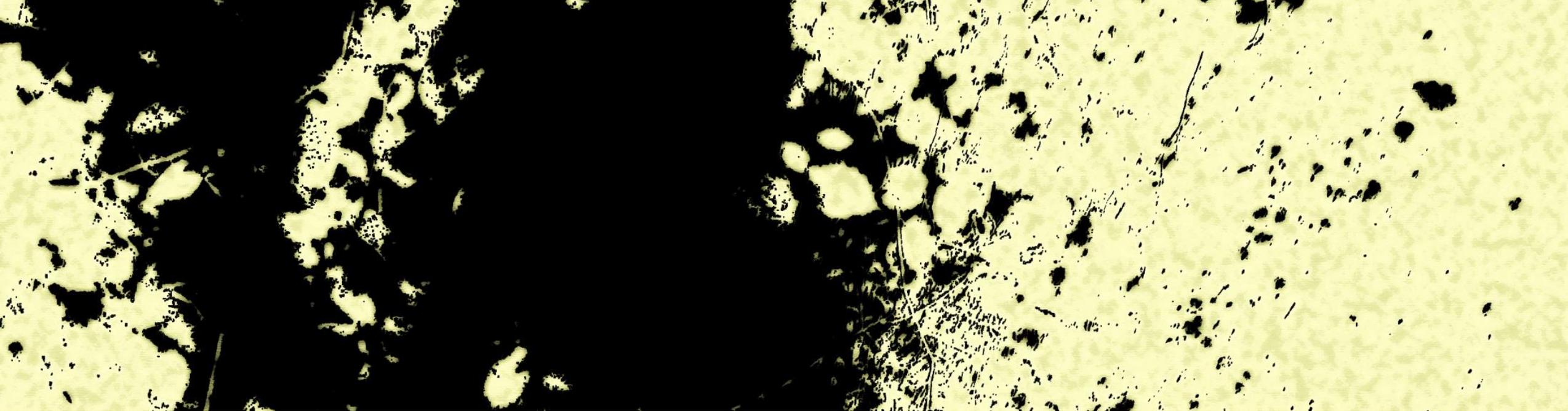


Source : [http://etoiledelune.pagesperso-orange.fr/divers/phase\\_lune.jpg](http://etoiledelune.pagesperso-orange.fr/divers/phase_lune.jpg)

Éclairement lumineux	Exemple
<1 lux	Clair de lune
0,25 lux	Pleine lune par une nuit claire
0,01 lux	Quartier de lune
0,002 lux	Ciel étoilé sans lune
0,0001 lux	Ciel couvert sans lune

*Le cycle lunaire influence l'activité des espèces nocturnes (jusqu'à l'inhibition de certains animaux)*

*Ex : Prugh & Golden 2014, Mougeot & Bretagnolle 2000*

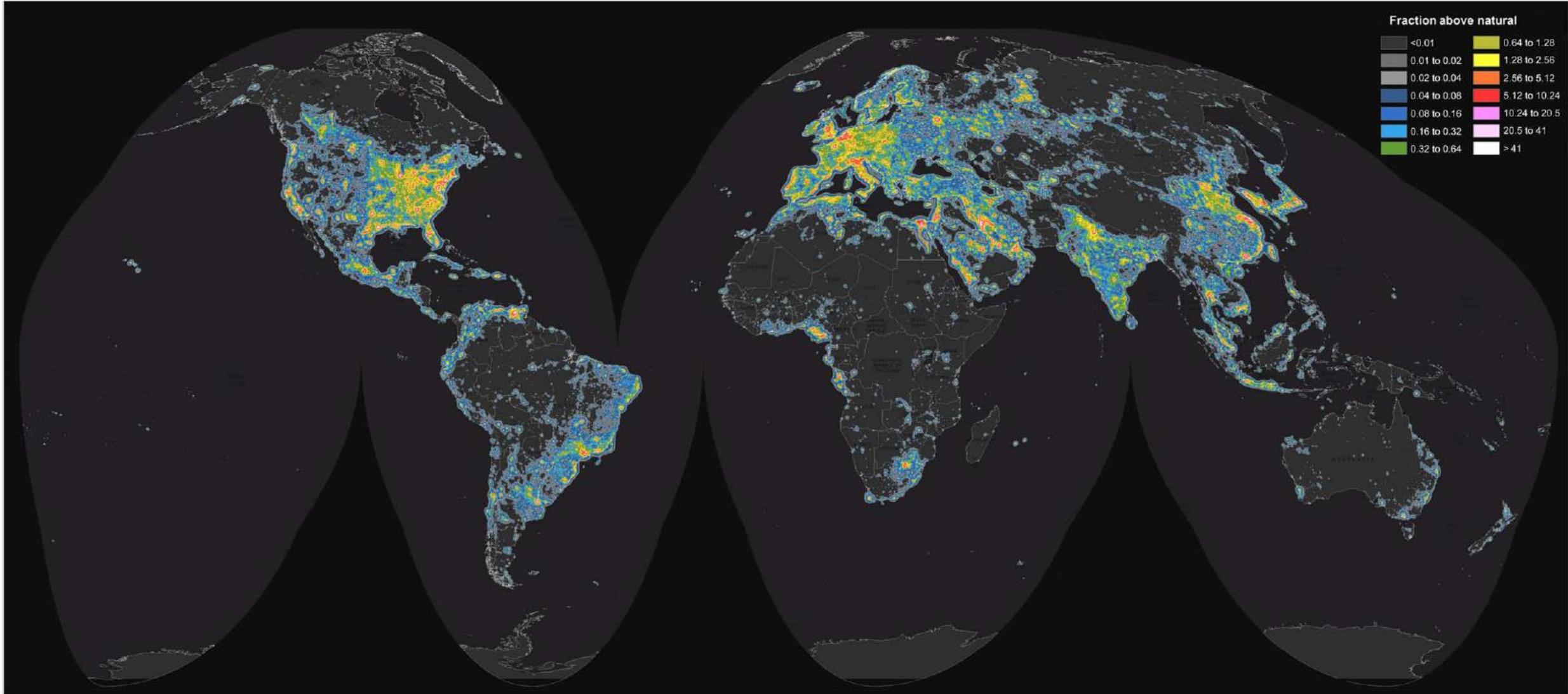


## 2. LE DÉPLOIEMENT DE L'ÉCLAIRAGE NOCTURNE

L'être humain, animal diurne produit de la lumière artificielle la nuit pour prolonger son activité dans l'obscurité



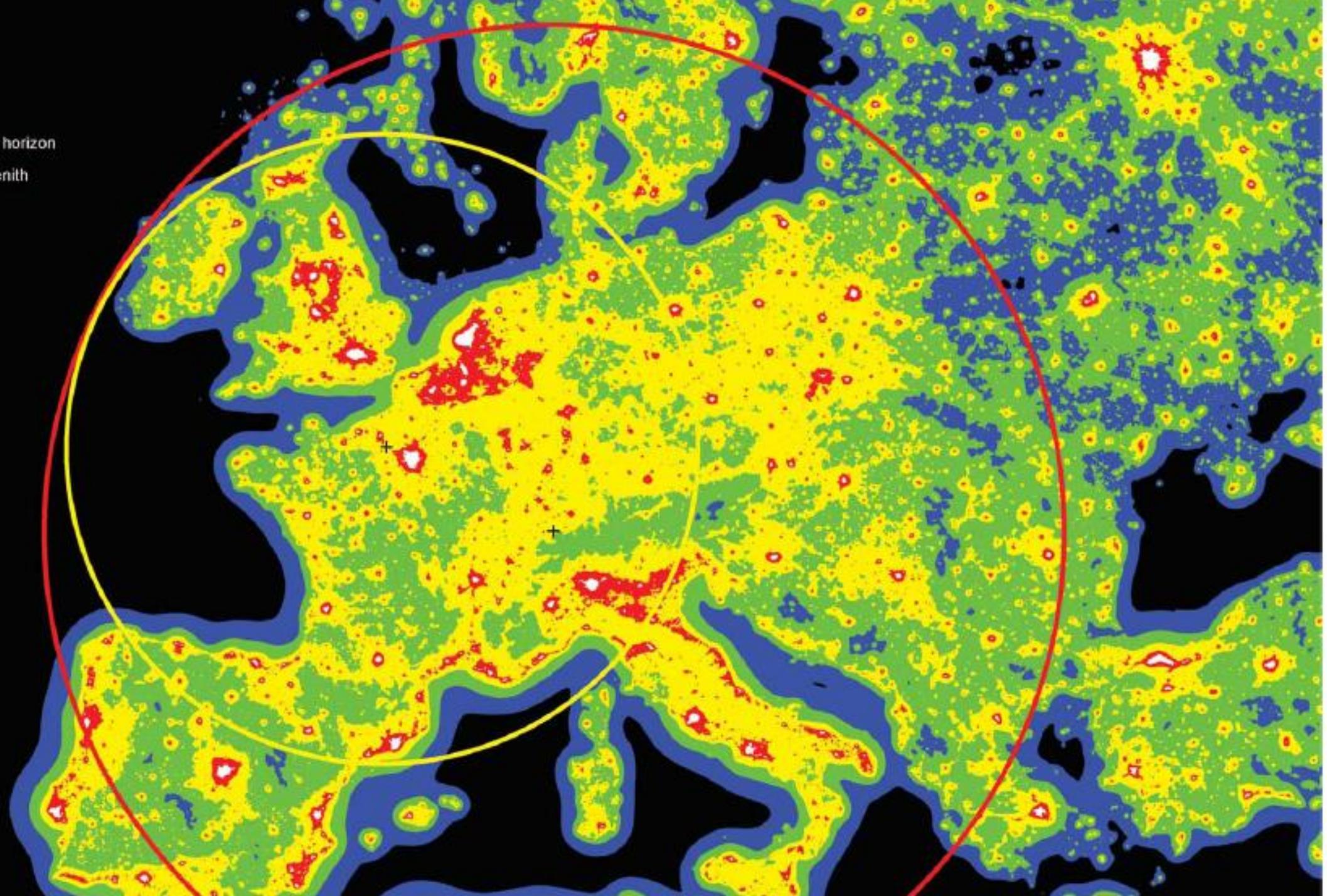
# *Un phénomène planétaire*



**Falchi et al., 2016**

### Visual impacts

- Pristine sky
- Degraded near the horizon
- Degraded to the zenith
- Natural sky lost
- Milky Way lost
- Cones active



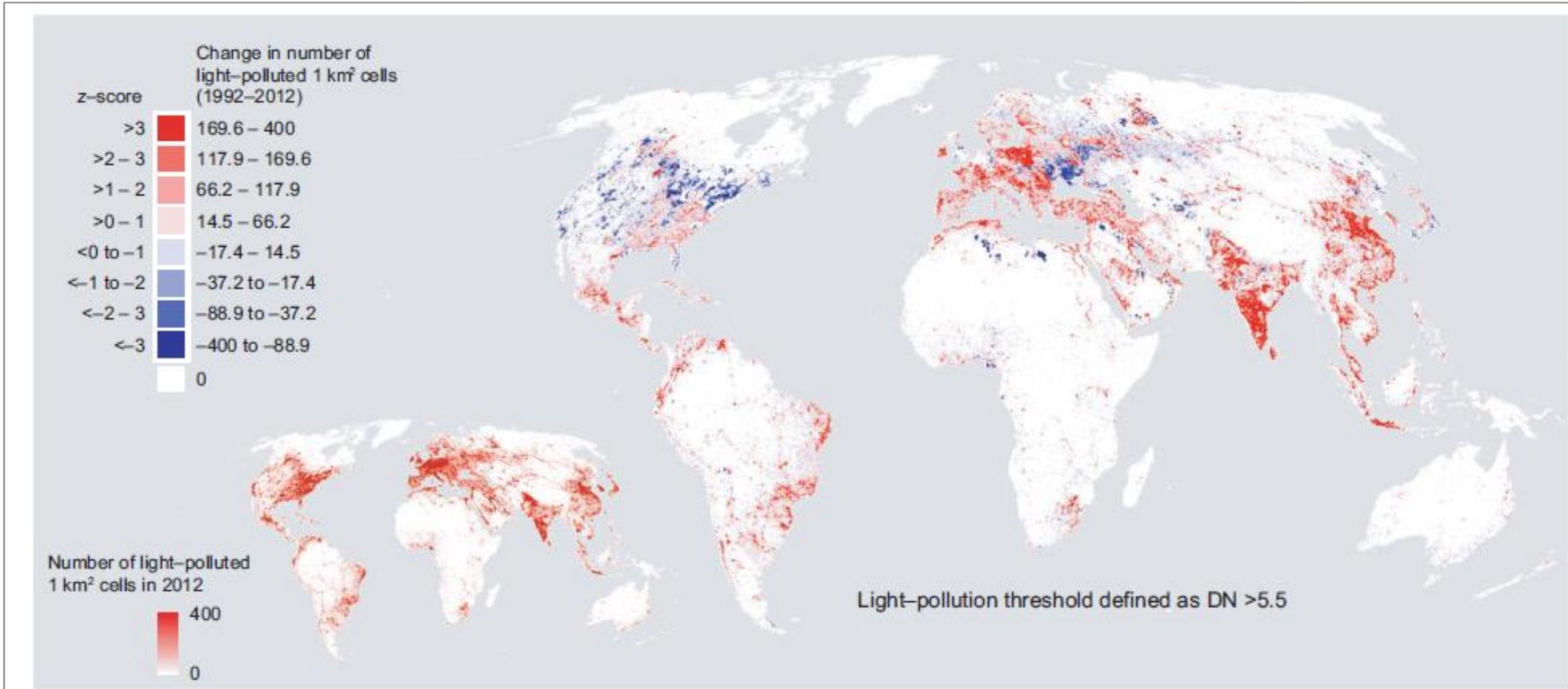
Falchi et al.,  
2016

# Une pollution en forte augmentation

Koen *et al.*, 2018

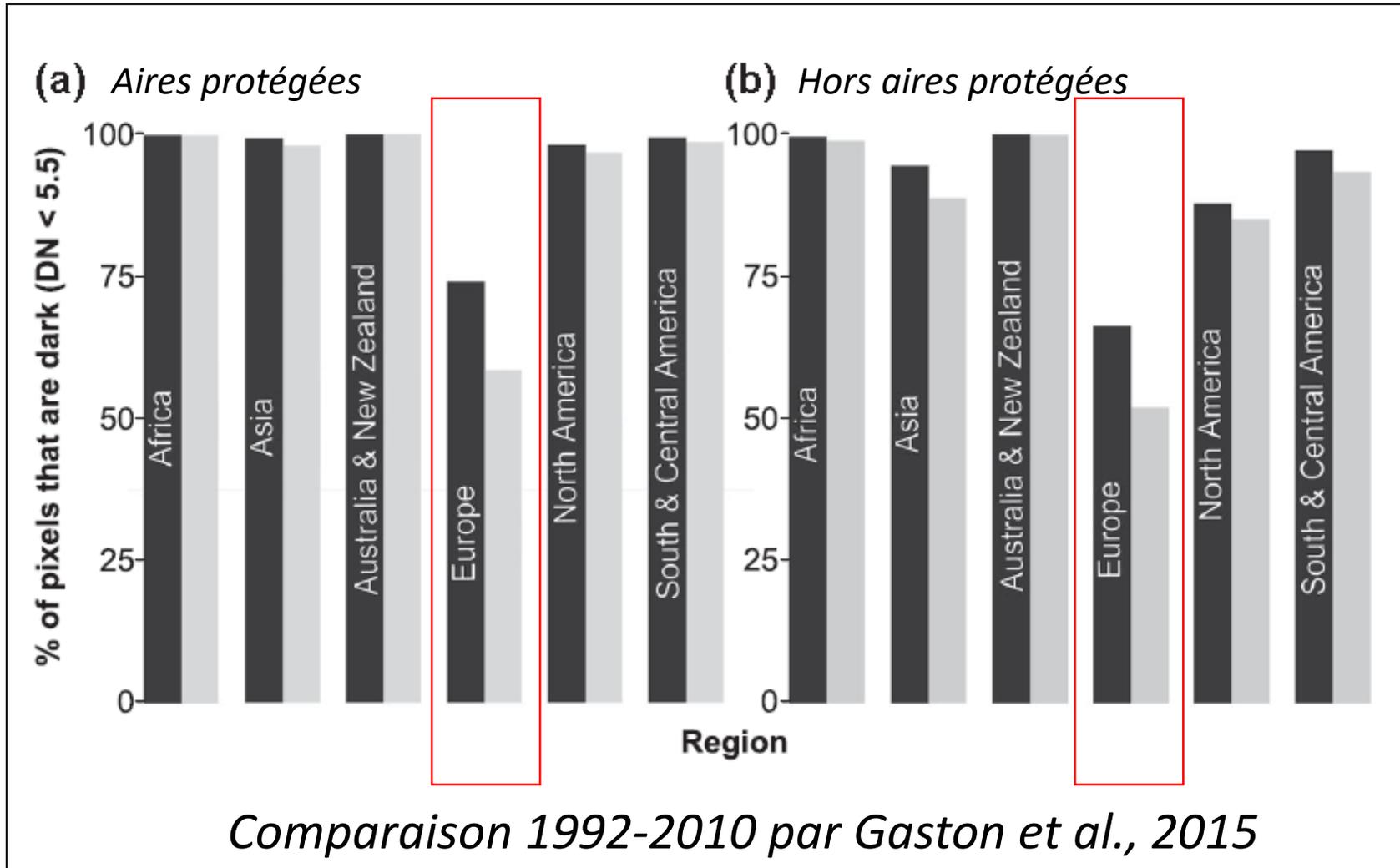
De 2012 à 2016 dans le monde :  
+2.2%/an de surface éclairée  
+1.8%/an de radiance

Kyba *et al.*, 2017



**FIGURE 1** Global change in light extent from 1992 to 2012. The change in area (the number of 1 km<sup>2</sup> cells in a 20 × 20 km quadrat) covered by light pollution (DN > 5.5) between 1992 and 2012. Inset map shows light polluted area (the number of 1 km<sup>2</sup> cells in a 20 × 20 km quadrat) in 2012.

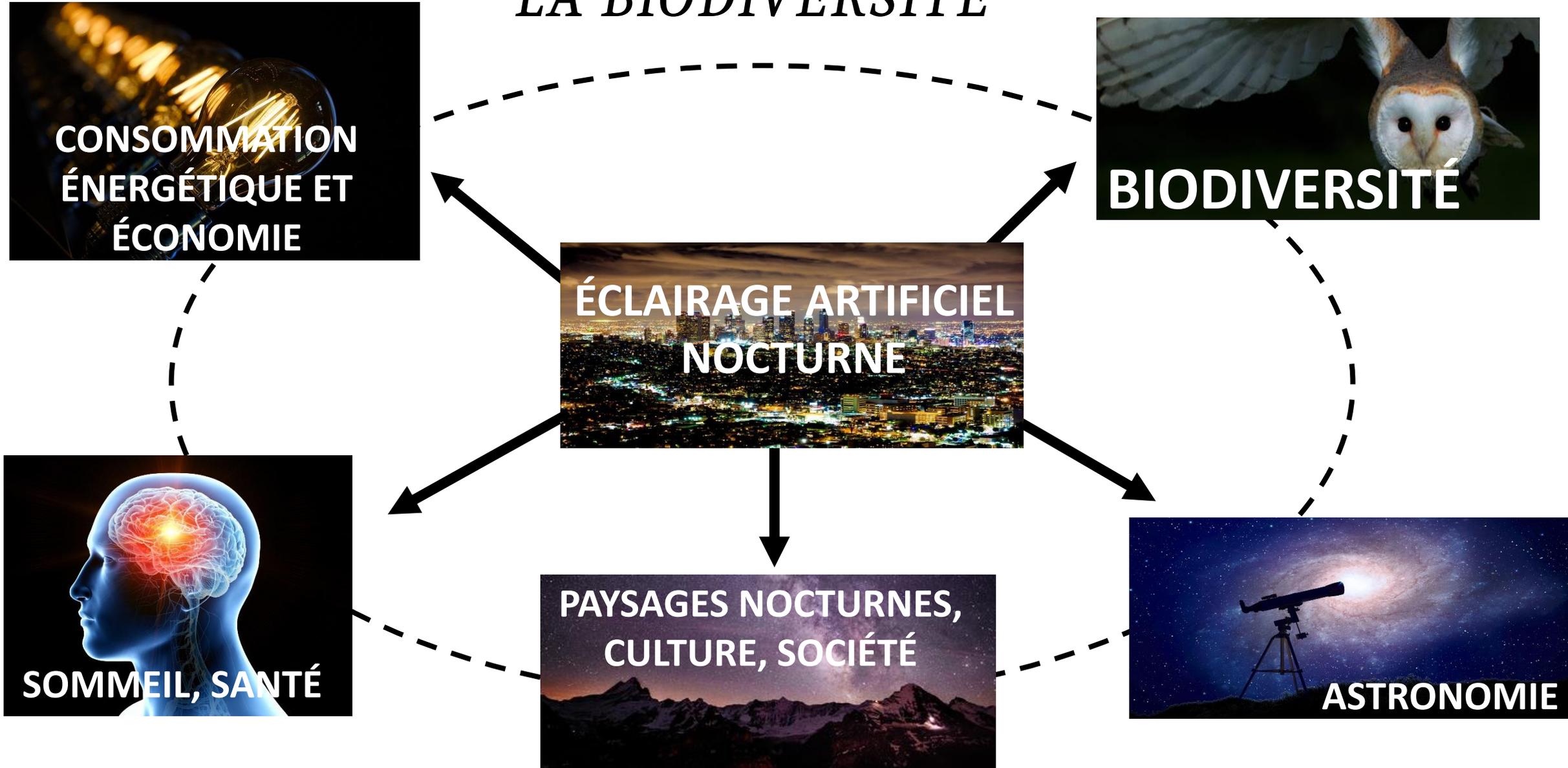
# Les aires protégées et les « hot spots » de biodiversité ne sont pas épargnés

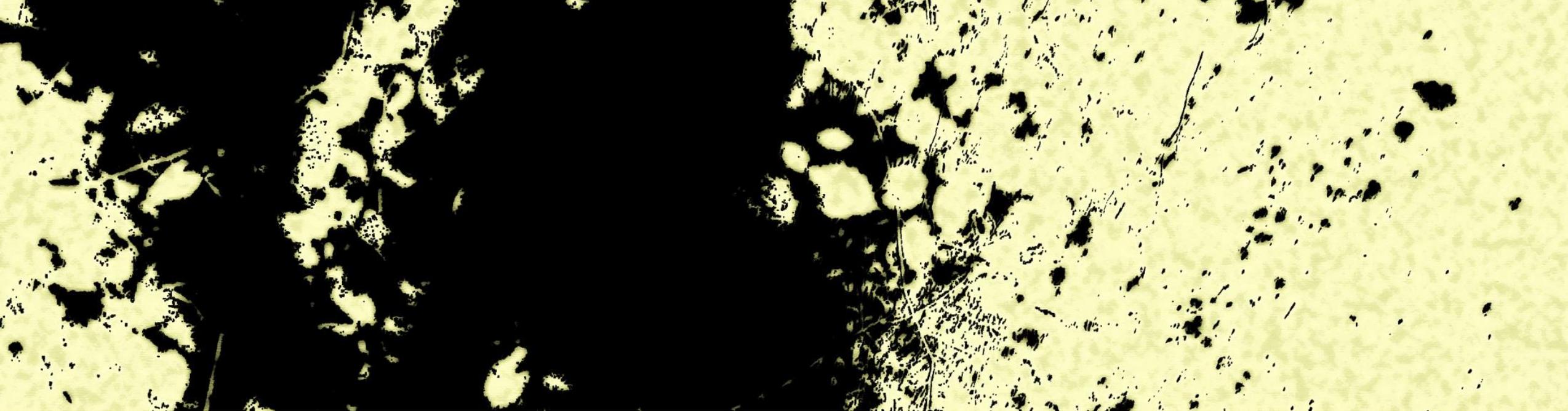


Les aires protégées sont « pressurisées » par leur périphérie

Guetté et al., 2018

# *DIFFÉRENTS ENJEUX SOULEVÉS ET NOTAMMENT SUR LA BIODIVERSITÉ*





# 3. LES EFFETS DE LA POLLUTION LUMINEUSE SUR LA BIODIVERSITÉ

# Des impacts désormais largement documentés, pour certains depuis plus d'un siècle

1900

*Premiers constats naturalistes (arbres en ville, collisions d'oiseaux)*

*Espèces emblématiques (tortues marines, oiseaux marins, papillons de nuits)*

*Montée en puissance de la recherche en écologie*

*Etude de nouveaux groupes biologiques, des niveaux complexes de biodiversité (relations, paysages, ...)*

2021

## Exemples :

- collisions d'oiseaux contre tours éclairées (Kumlien, 1888)
- retard dans la tombée des feuilles (Matzke 1936)



Photo : <https://pixabay.com/fr/phare-marine-maritime-mer-lum%C3%A8re-377821/>

# Trois synthèses récentes

Falcon *et al.*, 2020

<https://doi.org/10.3389/fnins.2020.602796>

Svechkina *et al.*, 2020

<https://doi.org/10.1007/s10980-020-01053-1>



REVIEW  
published: 16 November 2020  
doi: 10.3389/fnins.2020.602796



Landscape Ecol (2020) 35:1725–1742  
<https://doi.org/10.1007/s10980-020-01053-1>

REVIEW ARTICLE

## The impact of artificial light at night on human and ecosystem health: a systematic literature review

Alina Svechkina · Boris A. Portnov · Tamar Trop

<https://doi.org/10.1038/s41559-020-01322-x>

ecology & environment

## A meta-analysis of biological impacts of artificial light at night

Dirk Sanders <sup>1,2</sup>, Enric Frago <sup>3,4</sup>, Rachel Kehoe<sup>2</sup>, Christophe Patterson<sup>2</sup> and Kevin J. Gaston<sup>2</sup>

Sanders *et al.*, 2020 <https://doi.org/10.1038/s41559-020-01322-x>

Frontiers in Neuroscience

## Exposure to Artificial Light at Night and the Consequences for Flora, Fauna, and Ecosystems

Jack Falcón<sup>1\*</sup>, Alicia Torriglia<sup>2</sup>, Dina Attia<sup>3</sup>, Françoise Viénot<sup>4</sup>, Claude Gronfier<sup>5</sup>, Francine Behar-Cohen<sup>2</sup>, Christophe Martinsons<sup>6</sup> and David Hicks<sup>7</sup>

Biologia Futura  
<https://doi.org/10.1007/s42977-020-00065-x>

REVIEW



## Artificial night light alters ecosystem services provided by biotic components

Rajesh K. Singhal<sup>1</sup> · Jyoti Chauhan<sup>2</sup> · Hanuman S. Jatav<sup>3,4</sup> · Vishnu D. Rajput<sup>5</sup> · Gopal S. Singh<sup>6</sup> · Bandana Bose<sup>2</sup>

Received: 10 September 2020 / Accepted: 28 December 2020  
© Akadémiai Kiadó Zrt. 2021

Singhal *et al.*, 2021

<https://doi.org/10.1007/s42977-020-00065-x>

# Un pouvoir élémentaire : le phototactisme

Répulsion

Attraction

Action à distance !



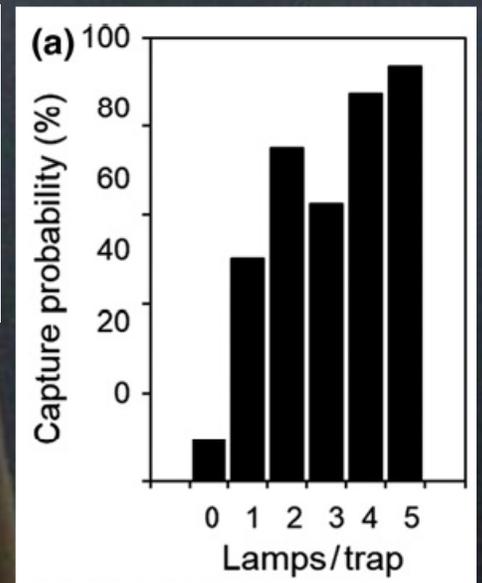
# Attraction, désorientation, collisions

=> *effets démographiques*  
Puits écologiques

*Ex : Justice & Justice 2016*

Des effets avec des  
quantités de lumière  
très faibles (# 1 lux)

*Eccart et al. 2018*



# Evitement des zones éclairées

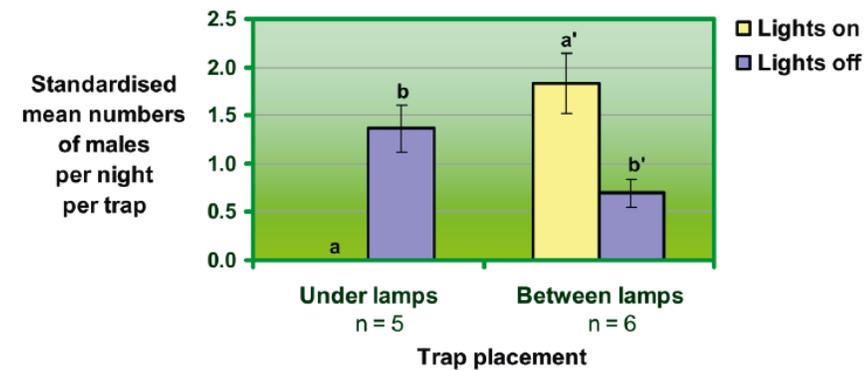
=> Dégradation et recul de l'habitat spatial et temporel



Photo R. Sordello



Photo S. Winter



**Figure 3** Standardised mean numbers ( $\pm$  S.E.) of *L. noctiluca* males captured per night per trap under and between street lamps when lamps were switched on or switched off. Means with the same letter within trap placement categories were not significantly different (paired t-test,  $P \leq 0.005$ ).

Ineichen &  
Ruettimann, 2016

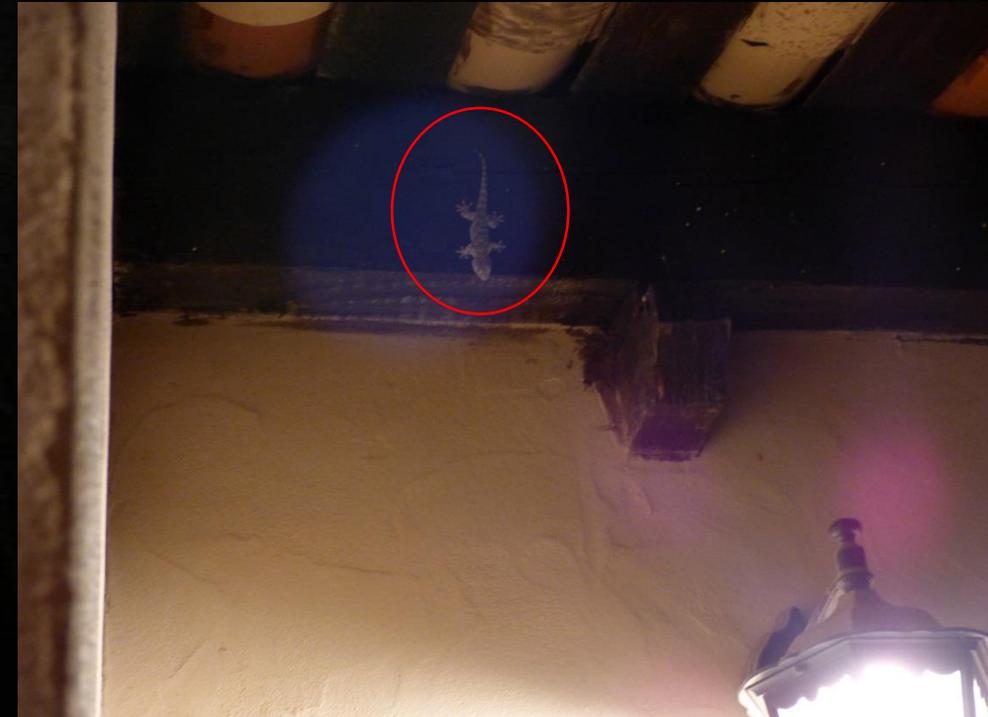
Ex : Picchi et al. 2013, Stone et al. 2009, Beier 1995



# *Déséquilibres populationnels*

Ex : rapports proies/prédateurs ou  
plantes/insectes (pollinisation)

*Ex : Minnaar et al. 2014, Decandido & Allen 2006,  
Knop et al. 2017*



# Fragmentation et mitage nocturne

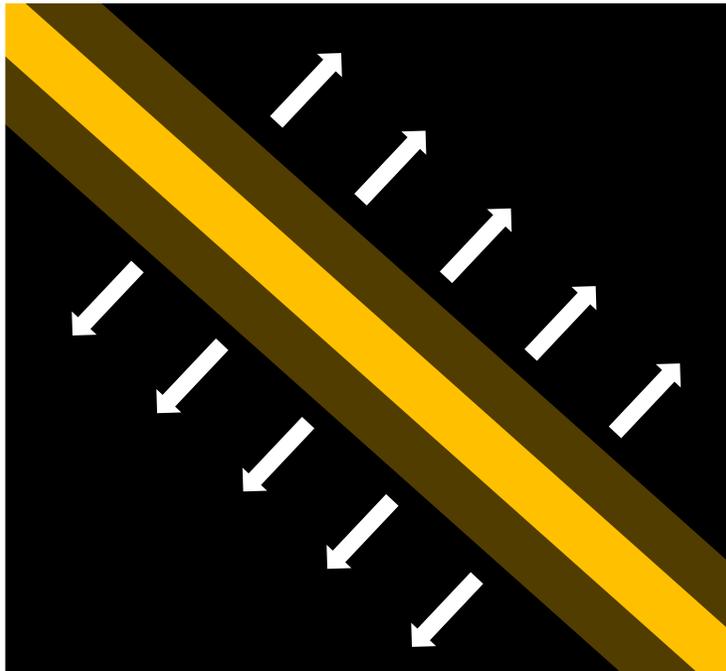
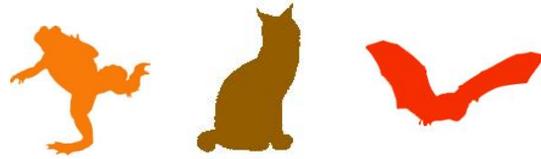
- Visuellement évident
- Désormais démontré sur le plan fonctionnel (ex : Van Grunsven *et al.*, 2017)



Synthèses :  
Sordello, 2017  
Sordello *et al.*, 2014

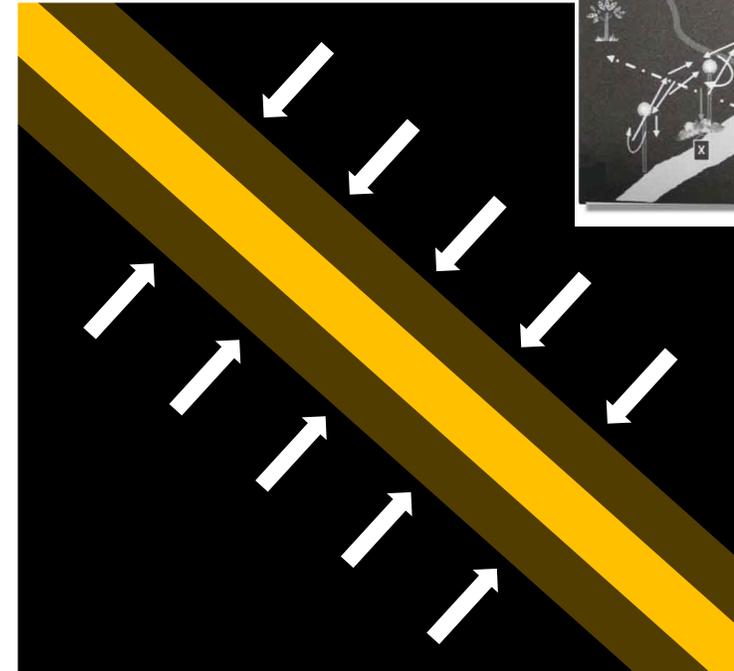
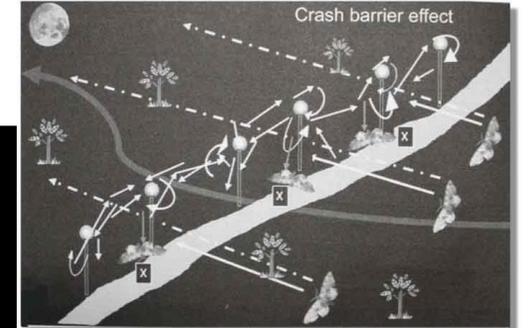
# Deux types de fragmentation en fonction du phototactisme

## Fragmentation par répulsion



Mammifères terrestres : Bliss-Ketchum et al., 2016  
Amphibiens : Van Grunsven et al., 2017

## Fragmentation par absorption



« crash barrier/vacuum effect »  
Théorisé dès 2006 pour les insectes par Eisenbeis

# La lumière artificielle perturbe les cycles du vivant

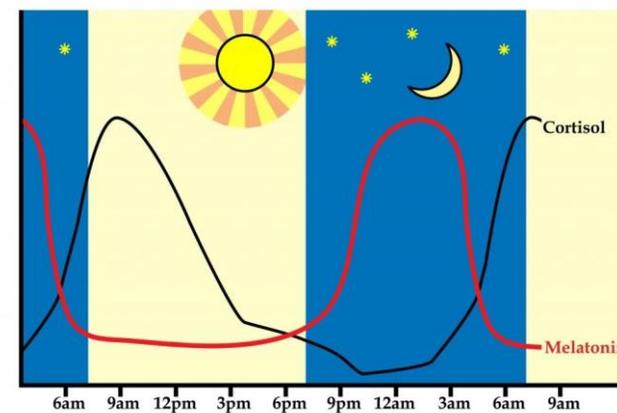
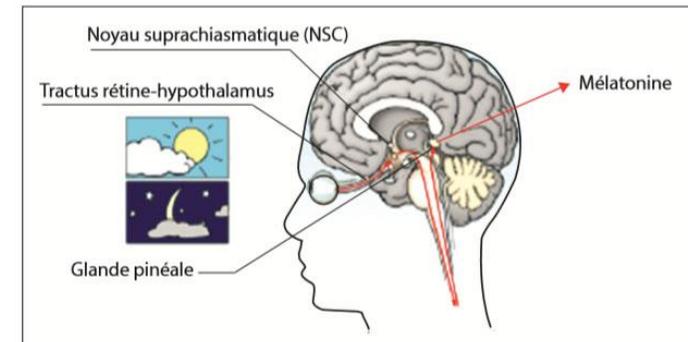
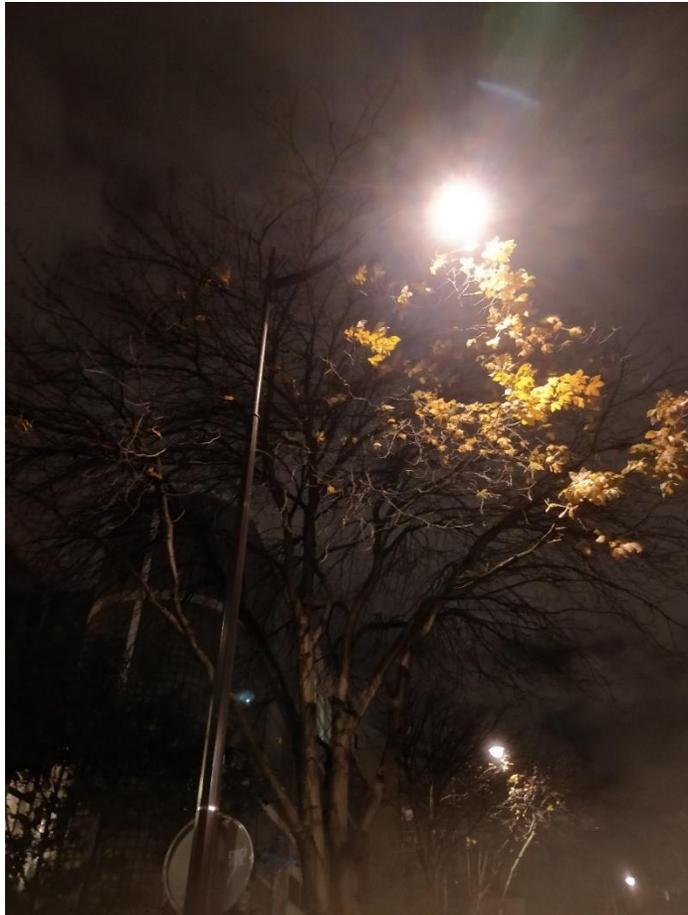
chez la flore

et

chez la faune

Ex : Matzke 1936, Ffrench-Constant et al. 2016

Ex : Le Tallec et al. 2013, Dominoni 2015, ...

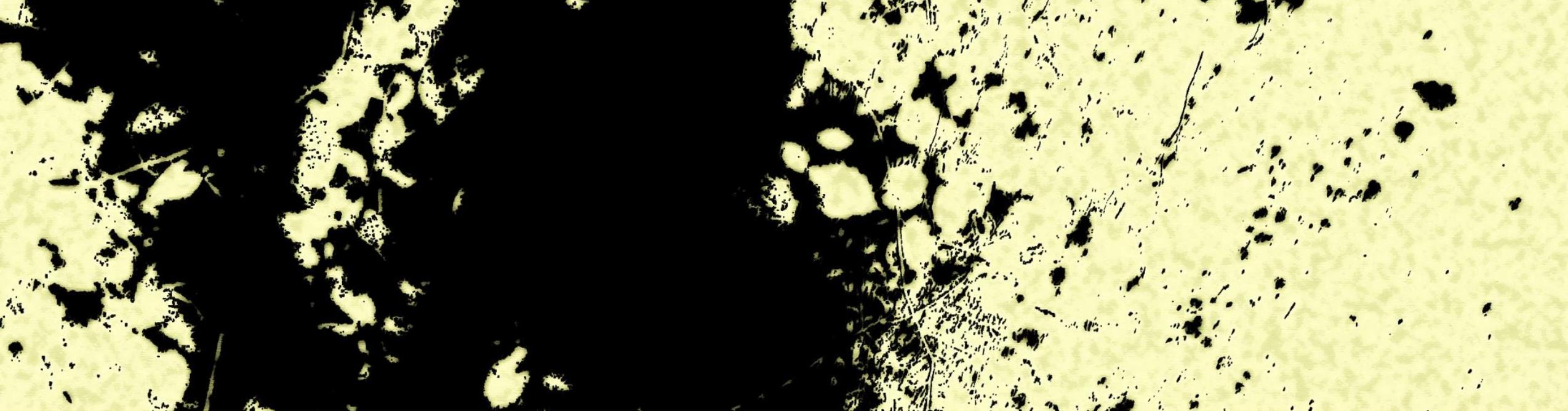


# Au final la pollution lumineuse est un problème multiforme

- De la lumière directe (éblouissement)
- De la lumière précise (points lumineux)
- De la lumière ambiante (luminosité)
- De la lumière projetée (sol, eau)
- De la lumière diffuse (halo, skyglow)



Sordello 2017  
Vertigo



# 3. LES SOLUTIONS

# Grands principes

Bonne nouvelle : la pollution lumineuse est **réversible**  
(contrairement à d'autres pollutions)

Se questionner sur l'**opportunité** même d'éclairer

Si le choix d'éclairer est fait (besoin) :

**éclairer ce qu'il faut, quand il faut, où il faut**

**Viser une sobriété lumineuse et non pas une sobriété énergétique**

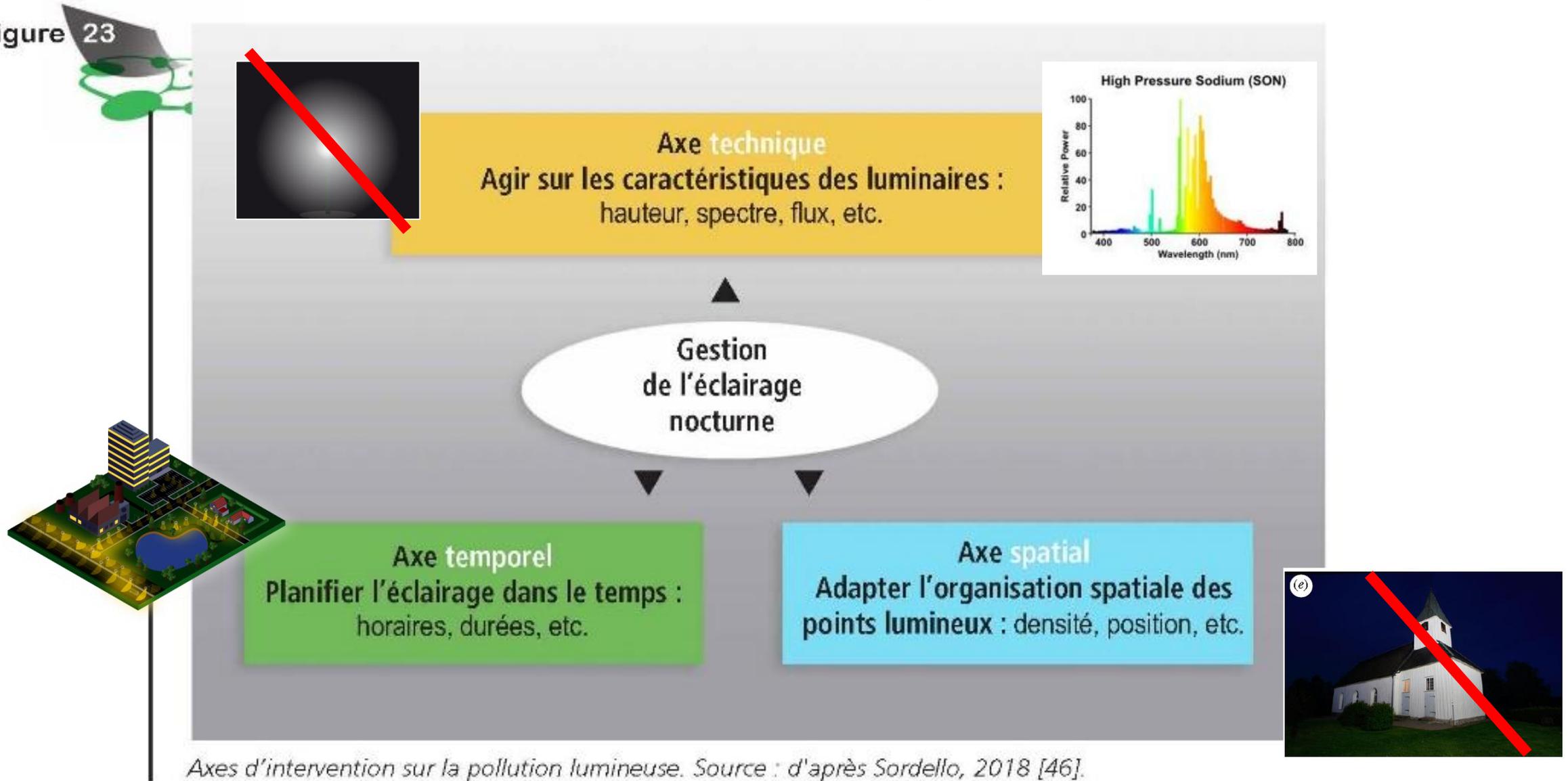
# Vers une gestion différenciée de l'éclairage



**Transposer à l'éclairage le modèle appliqué pour la végétation  
=> Graduation et absence d'éclairage en fonction des espaces et des enjeux**

# Trois axes d'actions possibles

Figure 23



Axes d'intervention sur la pollution lumineuse. Source : d'après Sordello, 2018 [46].

En France une réglementation fixe des prescriptions temporelles et/ou techniques pour certains éclairages



a) Eclairage sécurité/confort (notamment rues)



Enseignes lumineuses



b) Monuments



e) Parcs de stationnements



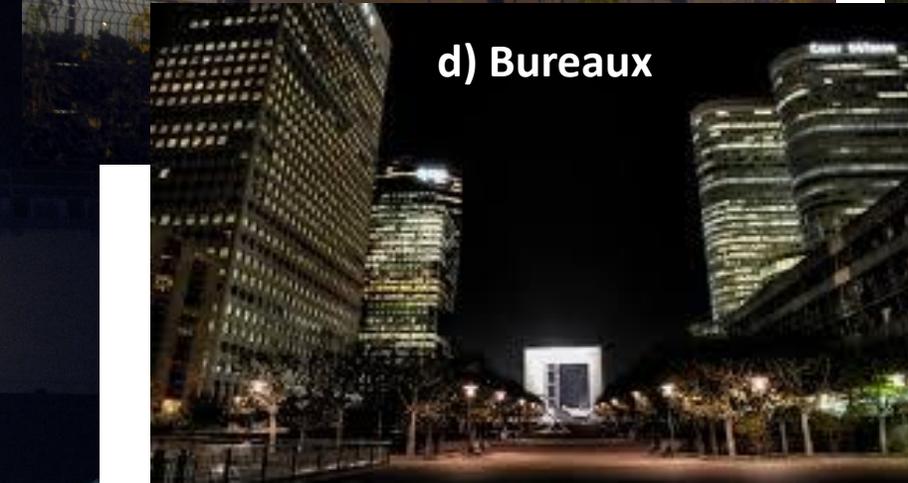
c) Structures sportives



b) Parcs et jardins



g) Chantiers



d) Bureaux

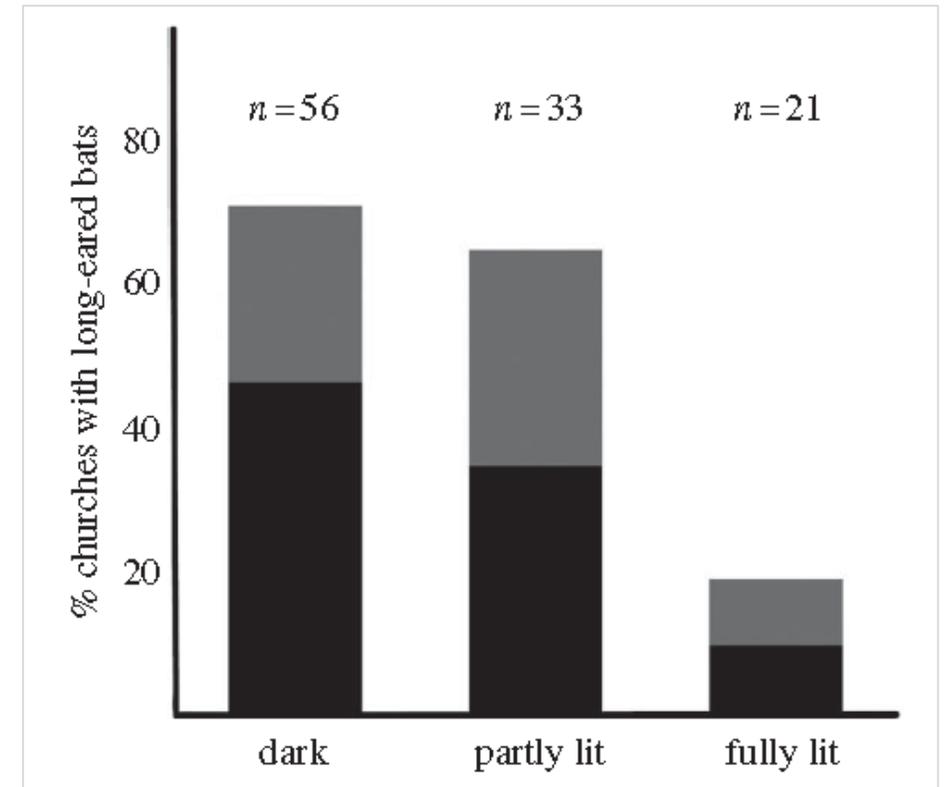


f) Evenementiels

# Axe spatial : gestion différenciée de l'éclairage

- **Graduation de l'éclairage** (ex : densité de points lumineux) voire absence totale d'éclairage en fonction des espaces
- Vigilance sur certains sites (ex : bâti patrimonial)
- Certains milieux très sensibles (ex : eau, littoral)
- Importance des revêtements (réflexion)

Rydell et al., 2018



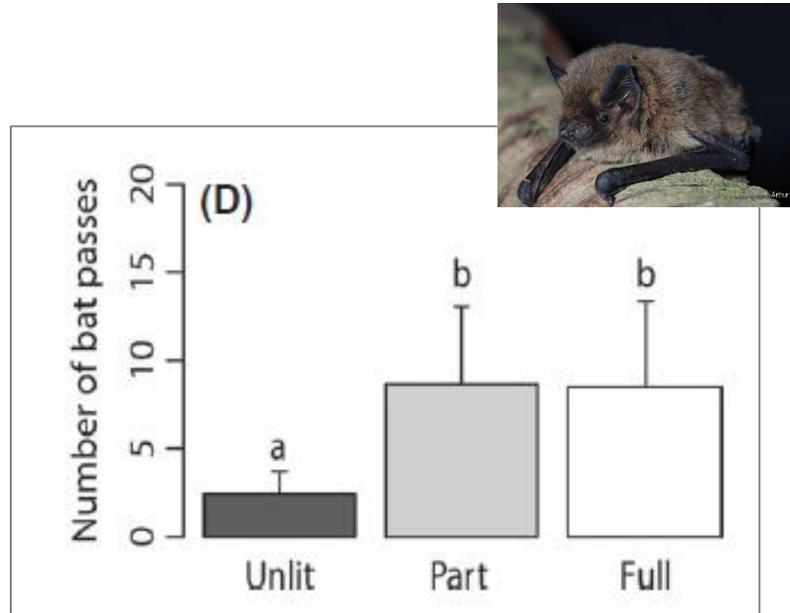
Sur 110 églises. Gris : colonies enregistrées. Noir : colonies observées



# La dimension temporelle : l'importance des chronotones

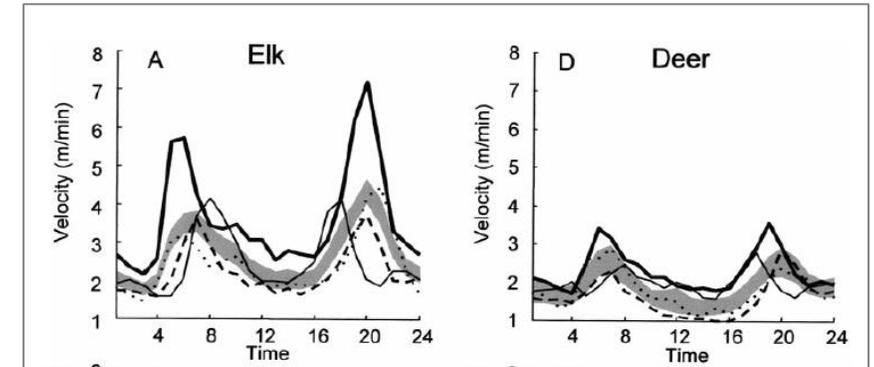
## Extinction en cœur de nuit :

- Plusieurs milliers de communes la pratiquent
- Modalités variables (totale, partielle)
- Efficacité : deux études sur les chauves-souris démontrent un bénéfice limité (Azam *et al.*, 2016 ; Day *et al.*, 2015)



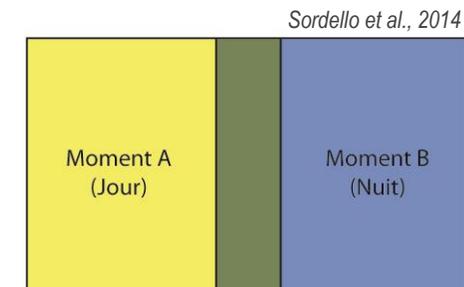
Pipistrelle de Khul *Pipistrellus kuhlii*  
Azam *et al.* 2016

## Activité bimodale très répandue chez les espèces nocturnes



Ager *et al.*, 2003

## Transition entre jour et nuit

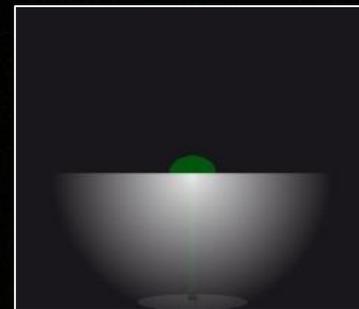
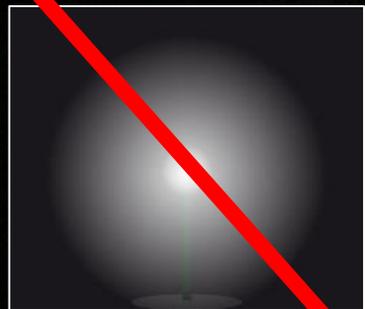


Sordello *et al.*, 2014

Moment de transition  
crépuscule ou aube  
(= Chronotone)

=> Les conflits d'usage se situent surtout au crépuscule et à l'aube

# *L'orientation*



# La composition de la lumière

Les effets de la lumière sur la faune et la flore sont variables selon la longueur d'onde lumineuse

Activité chez les chauves-souris  
Spoelstra *et al.*, 2017

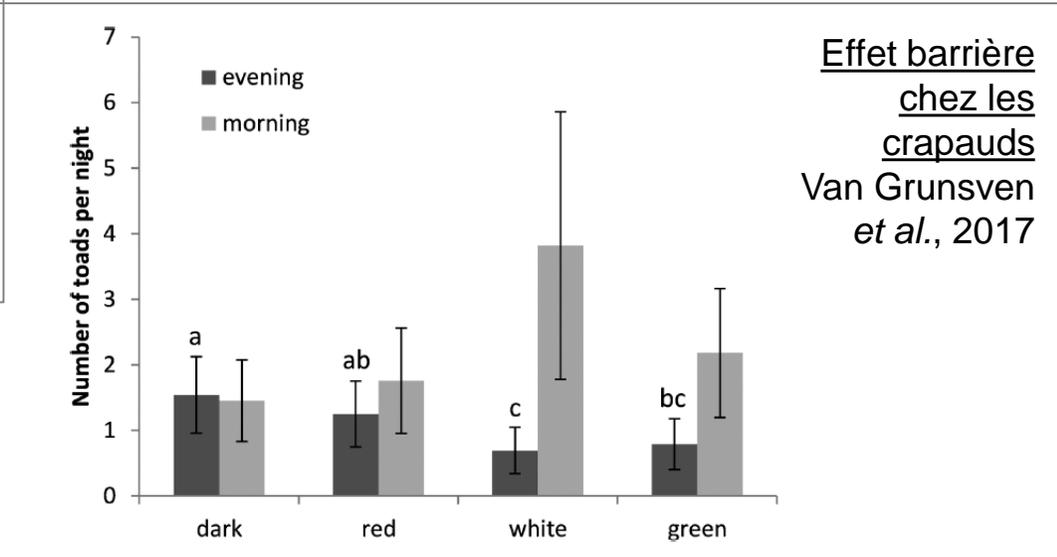
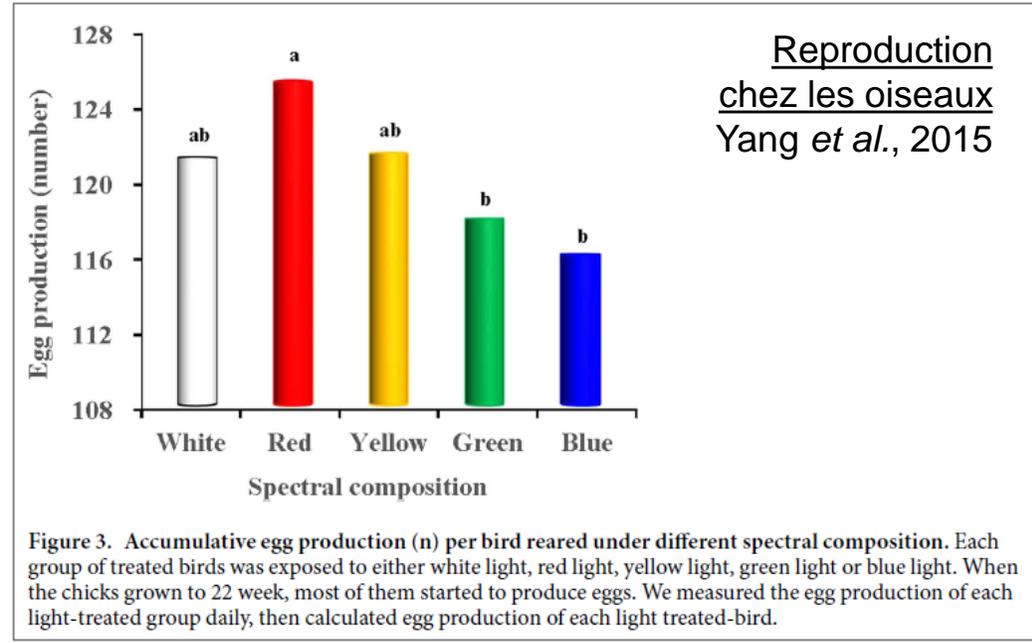
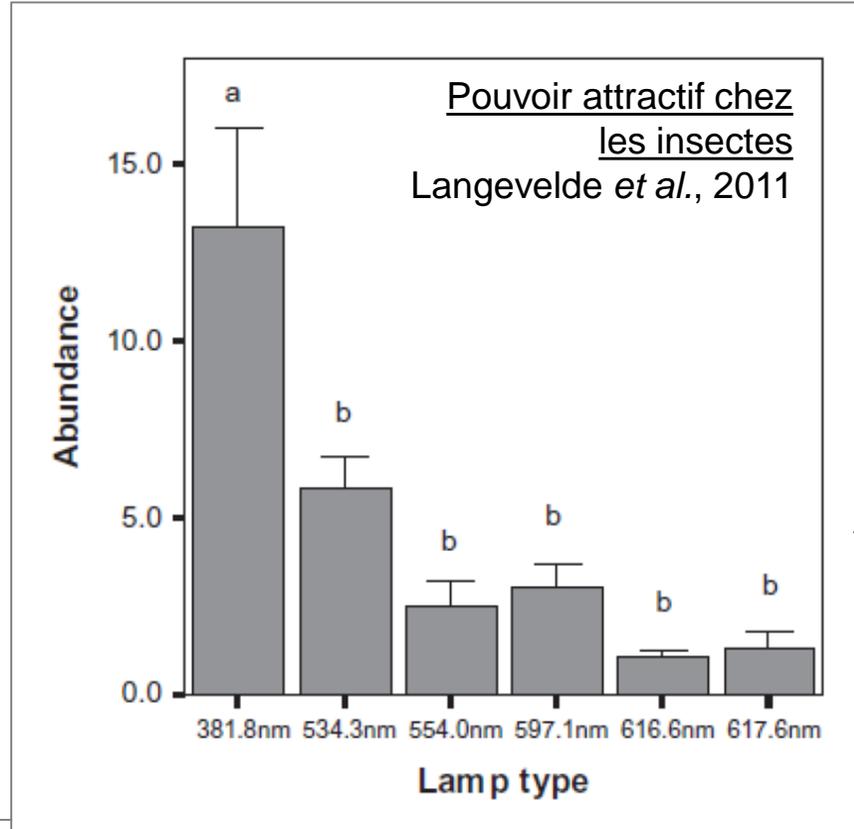
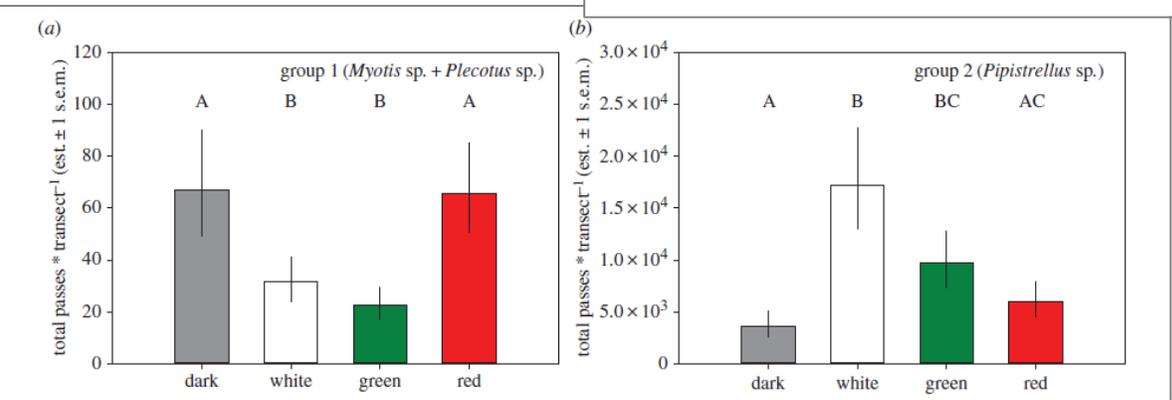
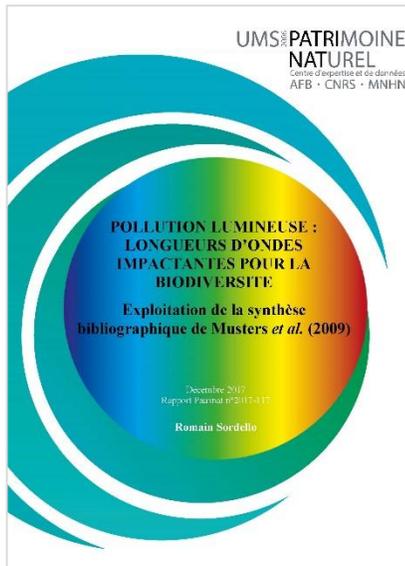


Figure 3. The mean number of toads caught per night, per bucket is given for every light treatment. Data are presented both for animals caught in the evening with the illumination turned on and the animals caught in the morning, i.e. after the light was turned off. Letters indicate significant contrasts in GLMMs and whiskers are standard deviations based on 10 000 sample bootstrapping.

# La composition de la lumière

*La lumière ne sert pas qu'à voir*

*Sensibilité variable aux plages de longueurs d'ondes selon les espèces et les fonctions considérées*



Sordello 2017  
d'après Musters et al 2009

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

Tableau 2 : Types d'impacts par plage de longueur d'onde pour chaque groupe biologique d'après Musters *et al* 2009

Légende :

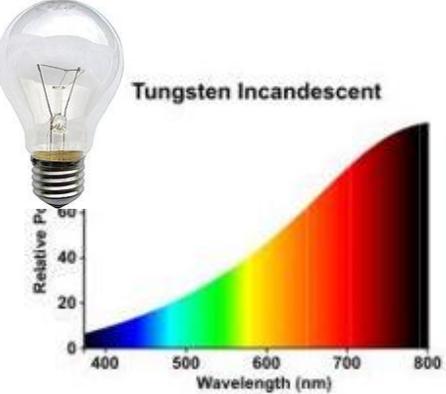
	1 type d'impact		2 types d'impacts		3 types d'impacts		4 types d'impacts
--	-----------------	--	-------------------	--	-------------------	--	-------------------

# Plusieurs sources lumineuses avec chacune leur spectre



## LAMPES A INCANDESCENCE

Le courant passe dans un filament qui produit alors de la chaleur et de la lumière



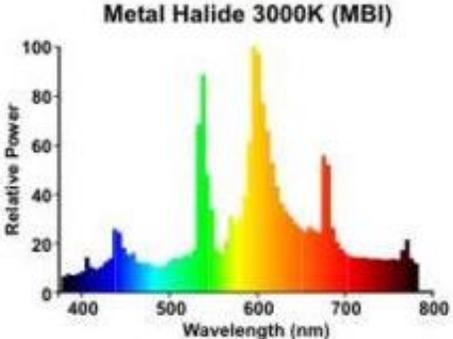
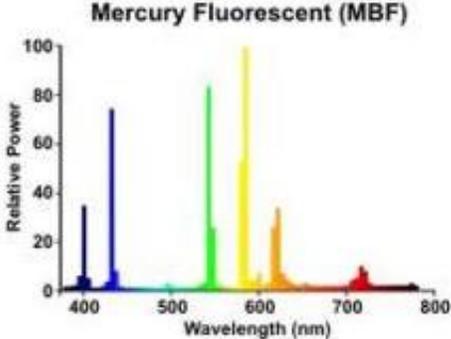
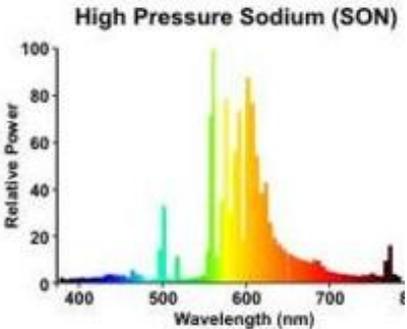
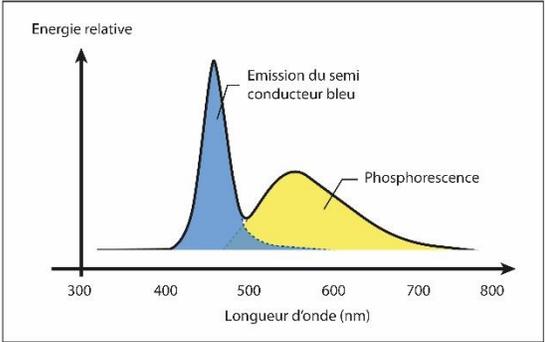
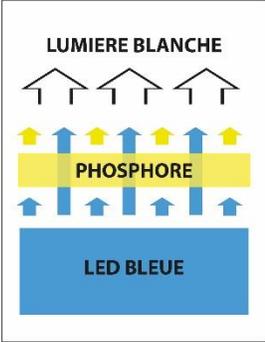
## LAMPES A DÉCHARGE

Une décharge électrique est envoyée dans un tube rempli de gaz

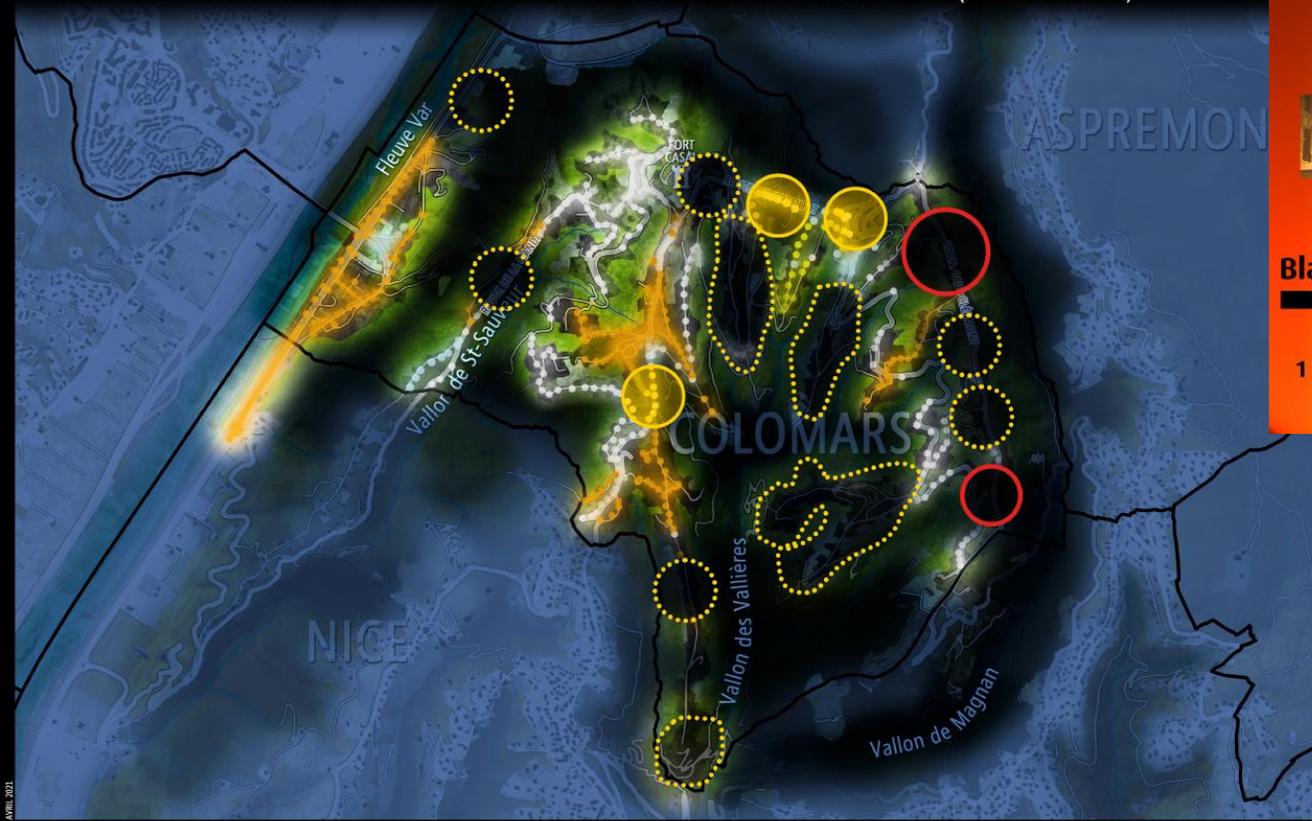


## SEMI-CONDUCTEURS LED, OLED

Diode Electro Luminescente  
Composés électroniques



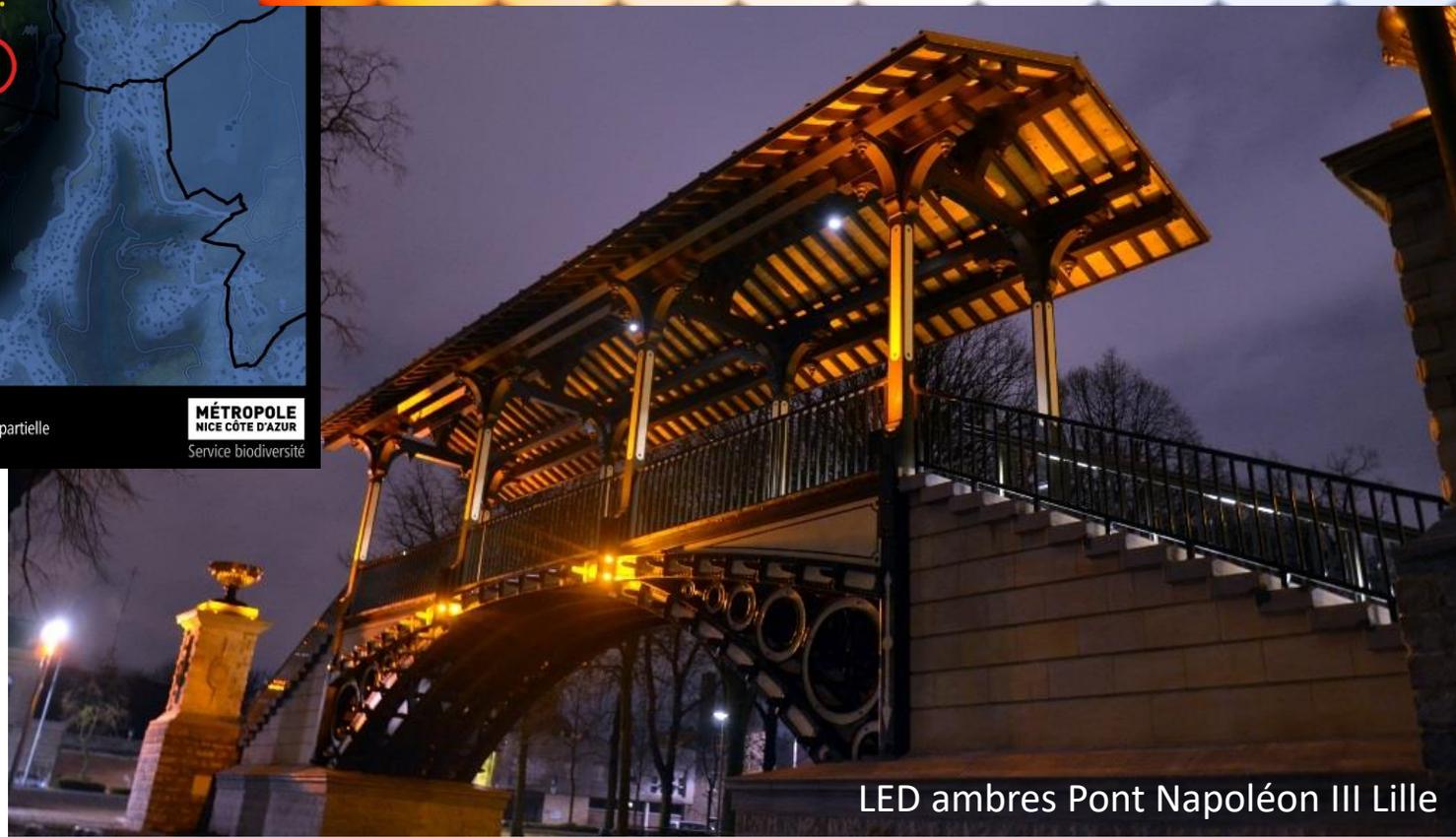
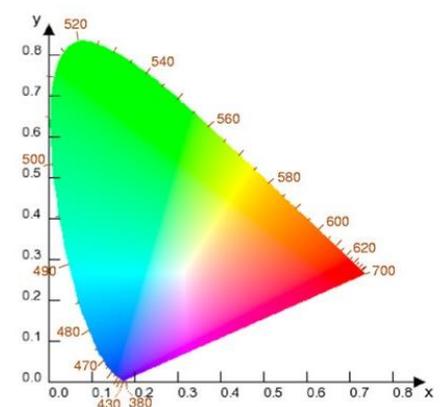
AMÉLIORATION DE L'ÉCLAIRAGE EN FAVEUR DES ESPÈCES NOCTURNES (PROPOSITIONS)



1 km

○ Extinction totale   
 ○ Extinction partielle   
 ○ Relanternage ambré / extinction partielle

**MÉTROPOLE**  
NICE CÔTE D'AZUR  
Service biodiversité



LED ambres Pont Napoléon III Lille

Photo F. Lamiot

# Focus sur les LED

## Principaux avantages



- Economie d'énergie



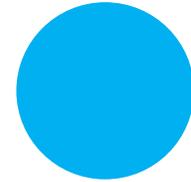
- Possibilités de pilotage



- Lumière plus ciblée

## Principaux inconvénients

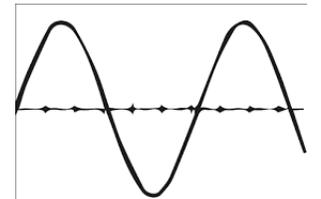
- Proportion de bleue potentiellement forte



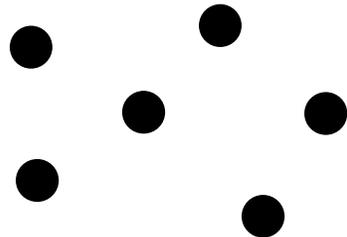
- Risque d'éblouissement pour la faune



- Effet « papillonnement »



- Effet « rebond » (multiplication des points lumineux à moindre couts)



# Une démocratisation de l'éclairage est en marche...

**BOUTEILLE À THÉ + HOUSSE**  
Ø 6,6x22,5 cm, verre, bois.  
+ d'infos p.7

**7€<sub>99</sub>**

**MACHINE À COUDRE À MAIN**  
L. 20,5 cm, piles.  
+ d'infos p.23

**4€<sub>99</sub>**

**DOUBLE PROJECTEUR SOLAIRE 330 LUMENS**  
10 LED, batterie li-ion 1000 mAh,  
autonomie 12h, vis et adhésif inclus

**14€<sub>99</sub>**  
dont écopart 0,20€

**PIVOTANT ET INCLINABLE À 360°**

**Détecteur de mouvement**

**Profitez de**



N'importe qui peut désormais être producteur de lumière avec des éclairages :

- de plus en plus puissants
- bon marchés
- sans consommation électrique (solaire)

=> Le « progrès technique n'incite pas à la sobriété (effet rebond)

# Synthèse des recommandations dans et vers les continuités écologiques

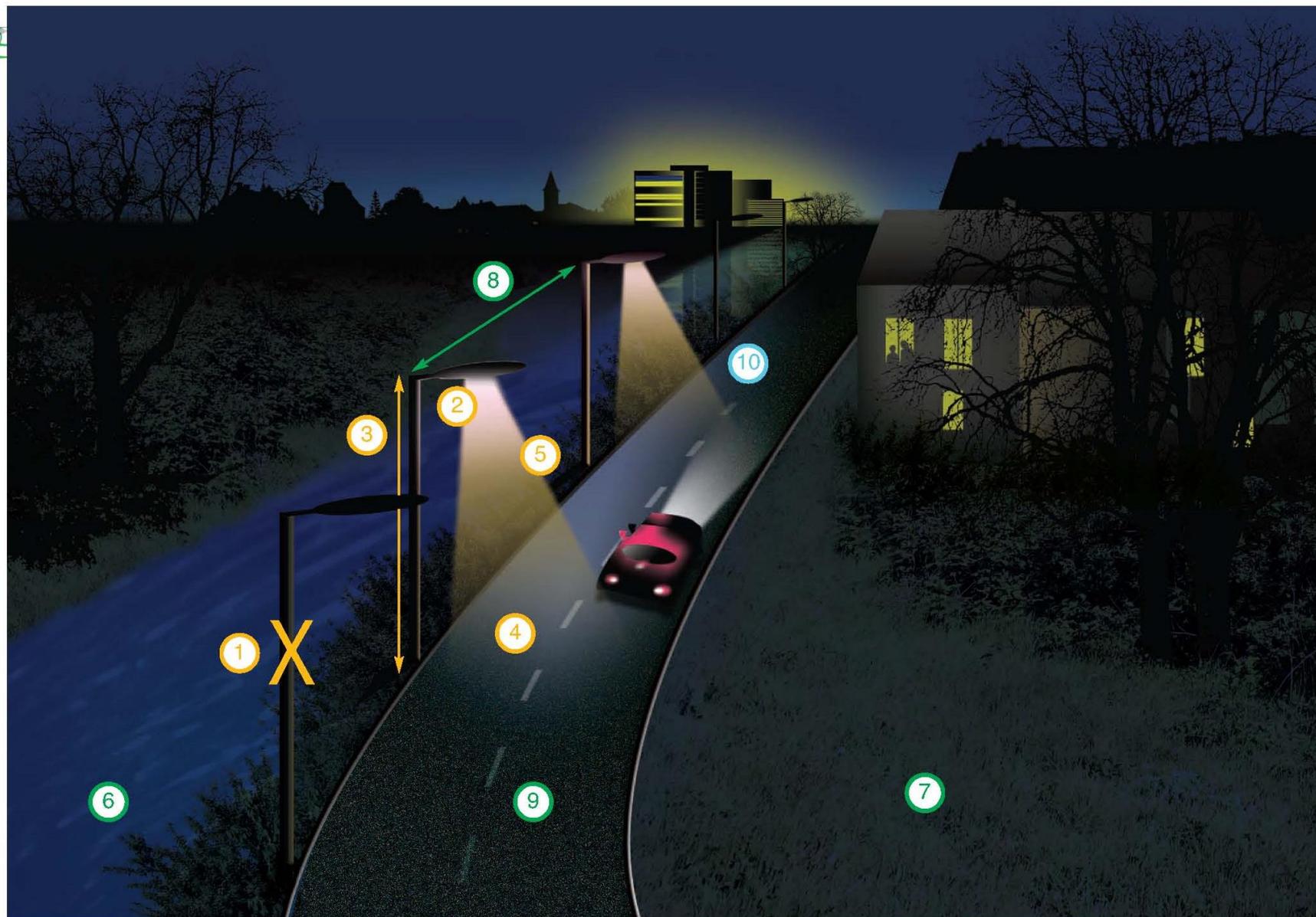
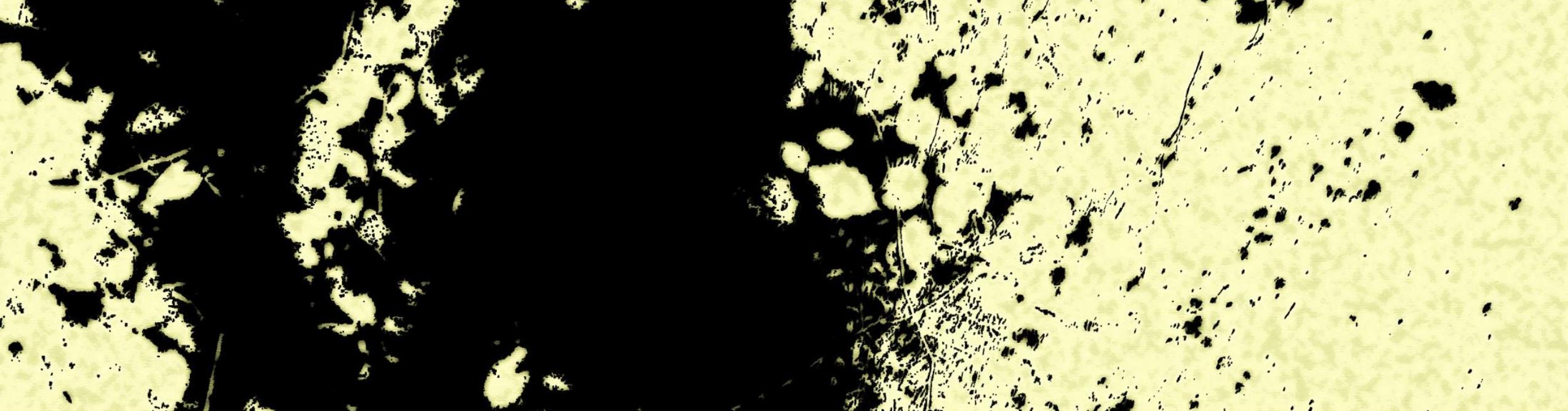


Illustration: Béatrice Saurel pour OFB

=> Sobriété de l'éclairage avant tout (éclairage passif, ...)

=> En cas d'éclairage :

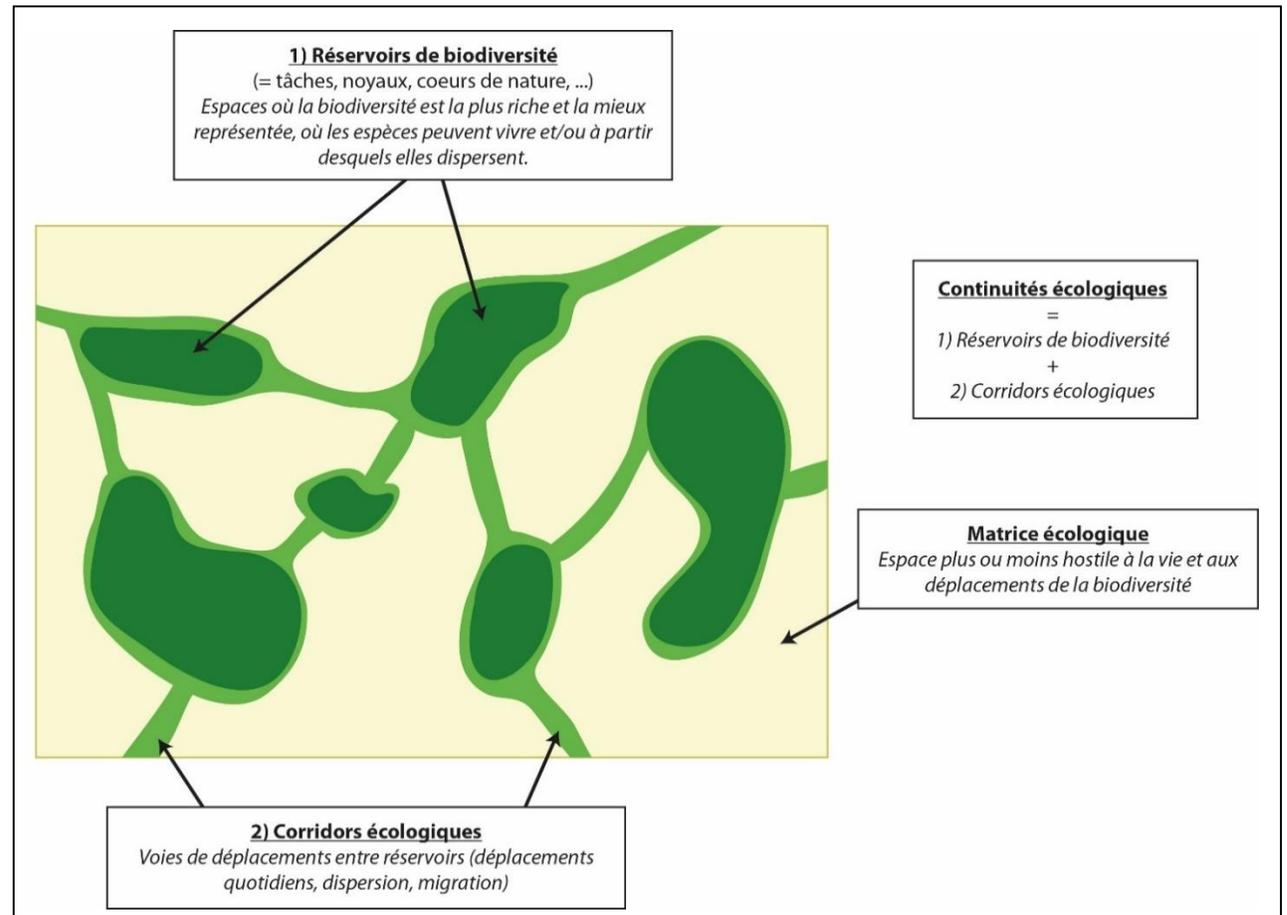
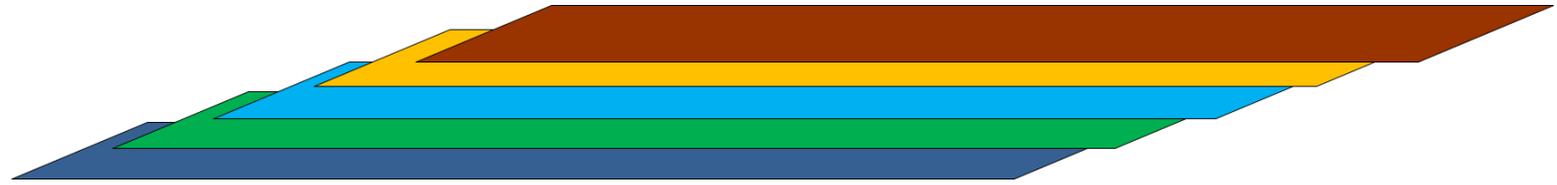
- temporalité réduite au minimum
- éclairer strictement la surface utile
- ne pas éclairer directement tout milieu naturel et habitat pour la biodiversité
- quantité de lumière la plus faible possible
- spectre le plus restreint possible et situé dans l'ombre
- aucun risque d'éblouissement pour la faune



# LA TRAME NOIRE

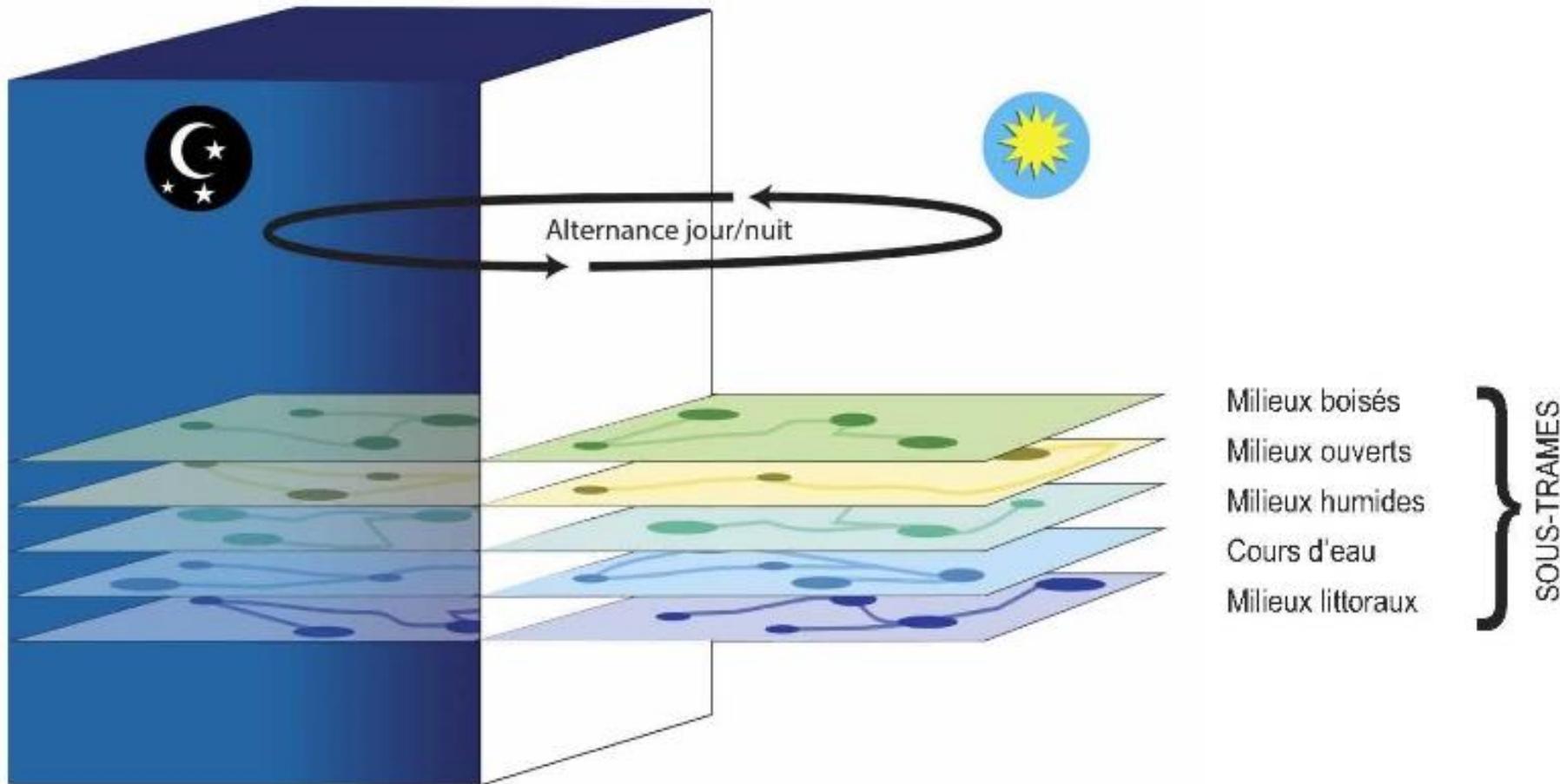
# Préserver et restaurer les continuités écologiques

- Lutter contre la fragmentation des habitats
- Prendre en compte la biodiversité dans l'aménagement du territoire
- Préserver et restaurer des continuités écologiques constituées de réservoirs de biodiversité et de corridors
- Pour différents milieux (sous-trames)
- En France : La Trame verte et bleue, politique publique née en 2007



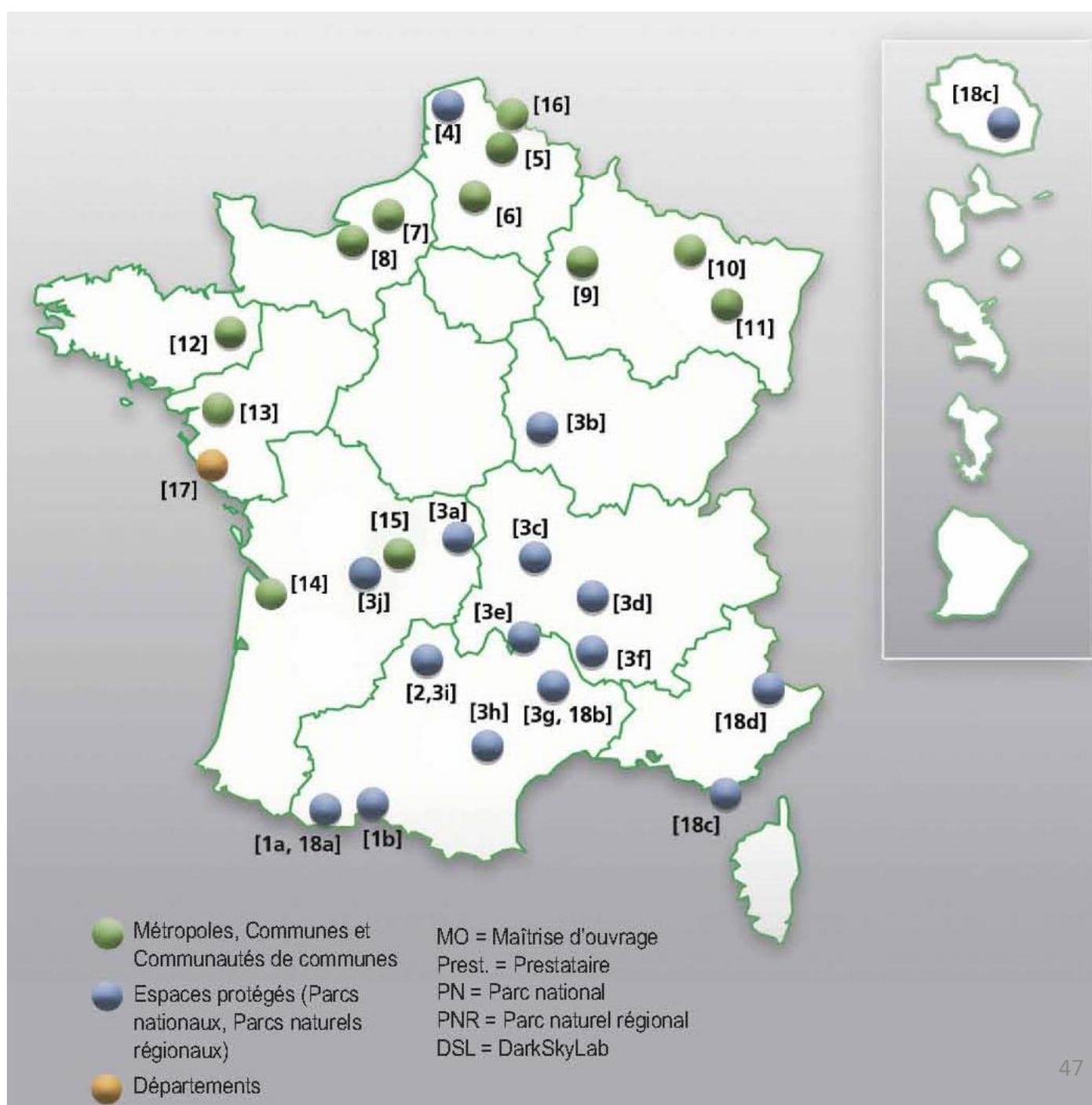
# Déclinaison nocturne => La Trame noire

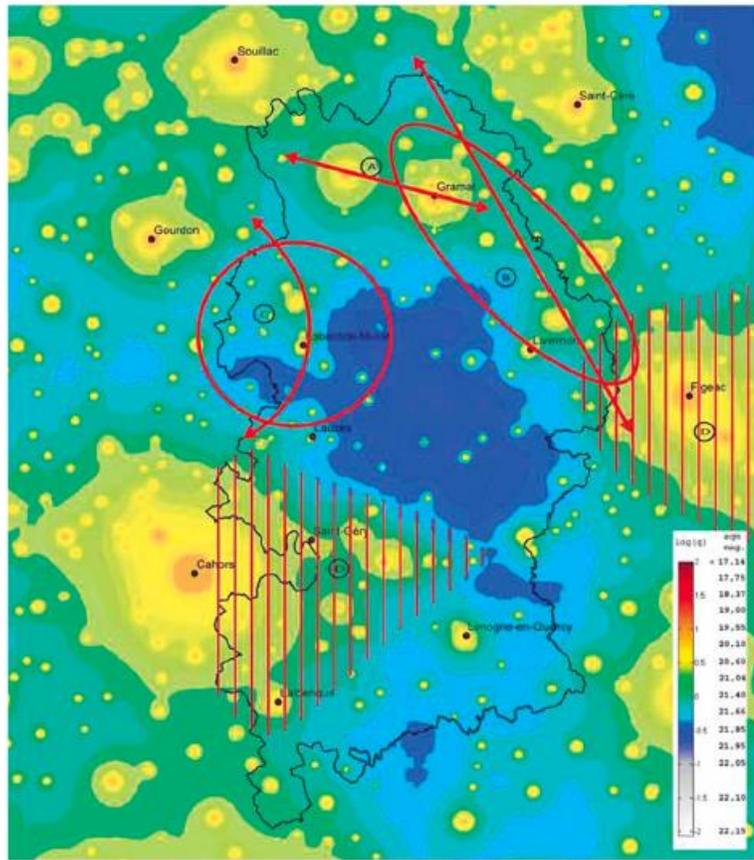
Un réseau écologique formé de réservoirs de biodiversité reliés par des corridors, **caractérisés par une obscurité suffisante pour la biodiversité la nuit**



# Différents projets de Trame noire déjà menés en France

- Dans des contextes variés (ruraux, urbains, protégés, ...)
- Portés par différents types d'acteurs (métropoles, espaces naturels, éclairagistes, etc.)
- Avec une diversité de méthodes et d'approches

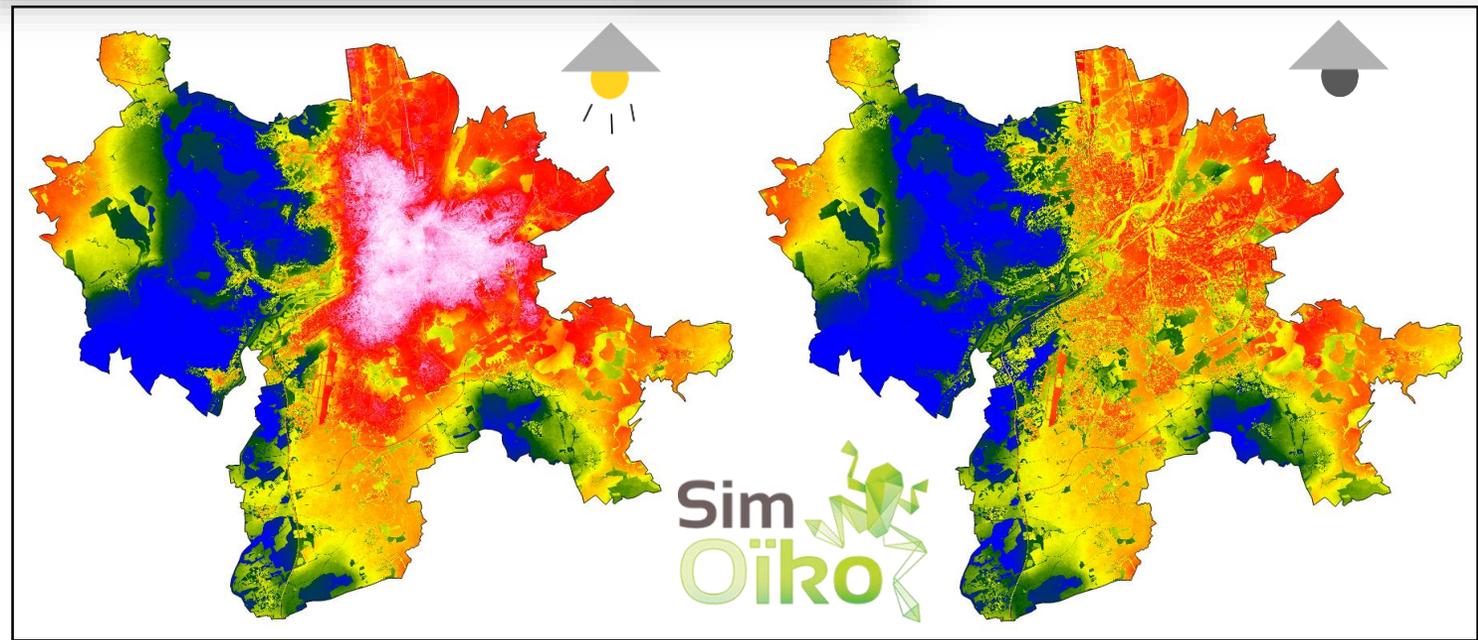
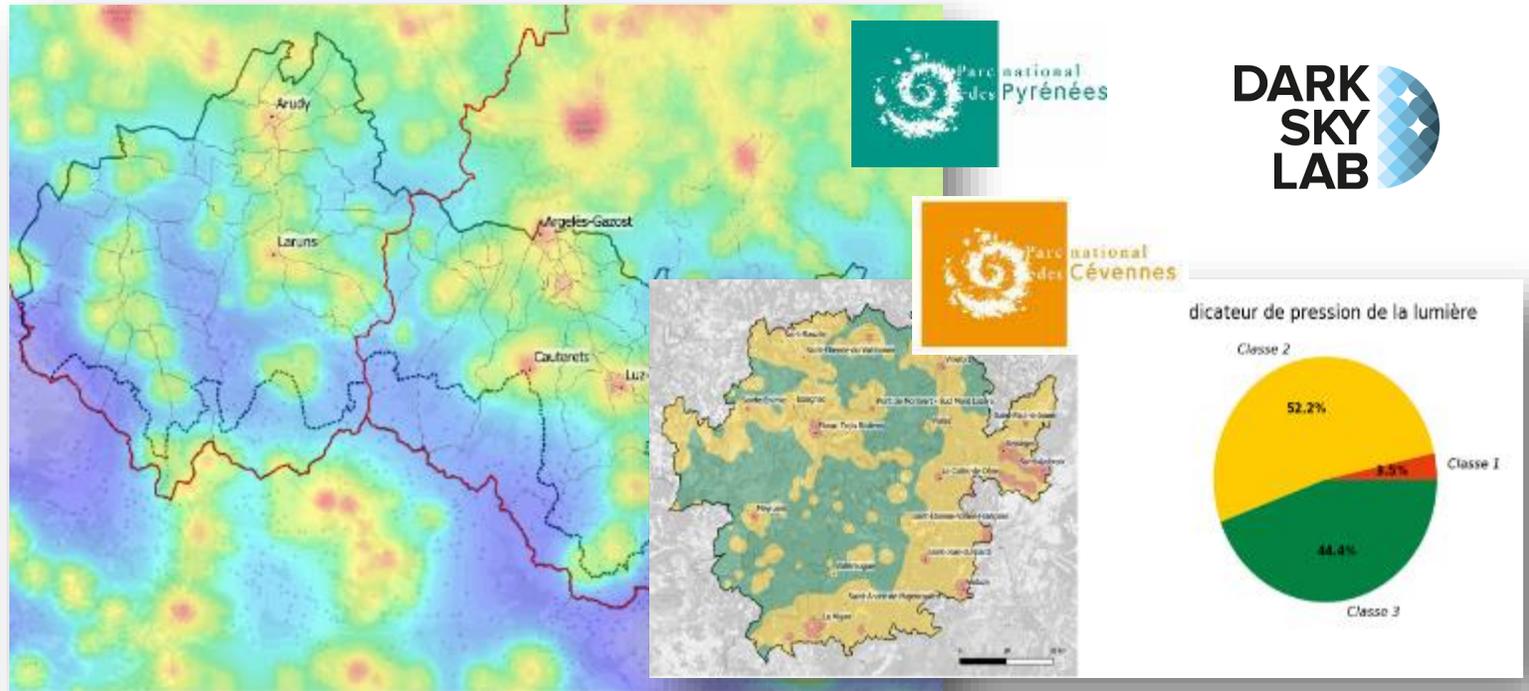


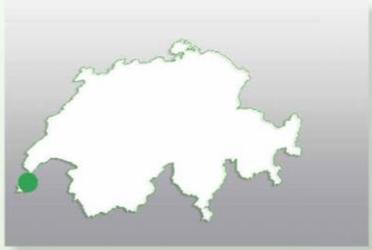


- Limites du PNR
- Halo de pollution lumineuse digitalisés pour une luminosité artificielle du ciel égale à sa luminosité naturelle
- Renvoi au détail des enjeux dans la fiche analyse du rapport
- Intrusion sur le territoire des halos des villes portes
- Zone de fort mitage par les halos des bourgs
- Création de barrières

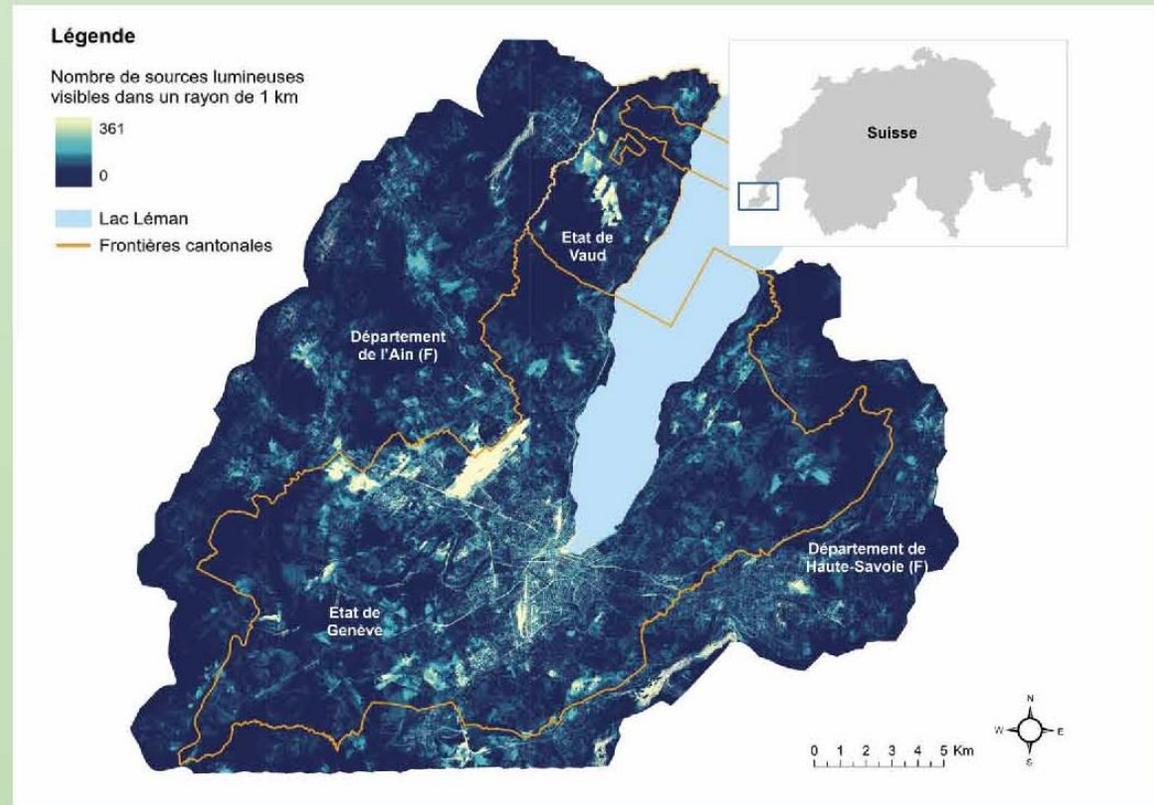


Source : Licornes / CD 64 / PNR CQ / BE SIRIS / BE Wateau et Segala –  
réalisation : PNR Causses du Quercy – Héroïse Garnier - 2012





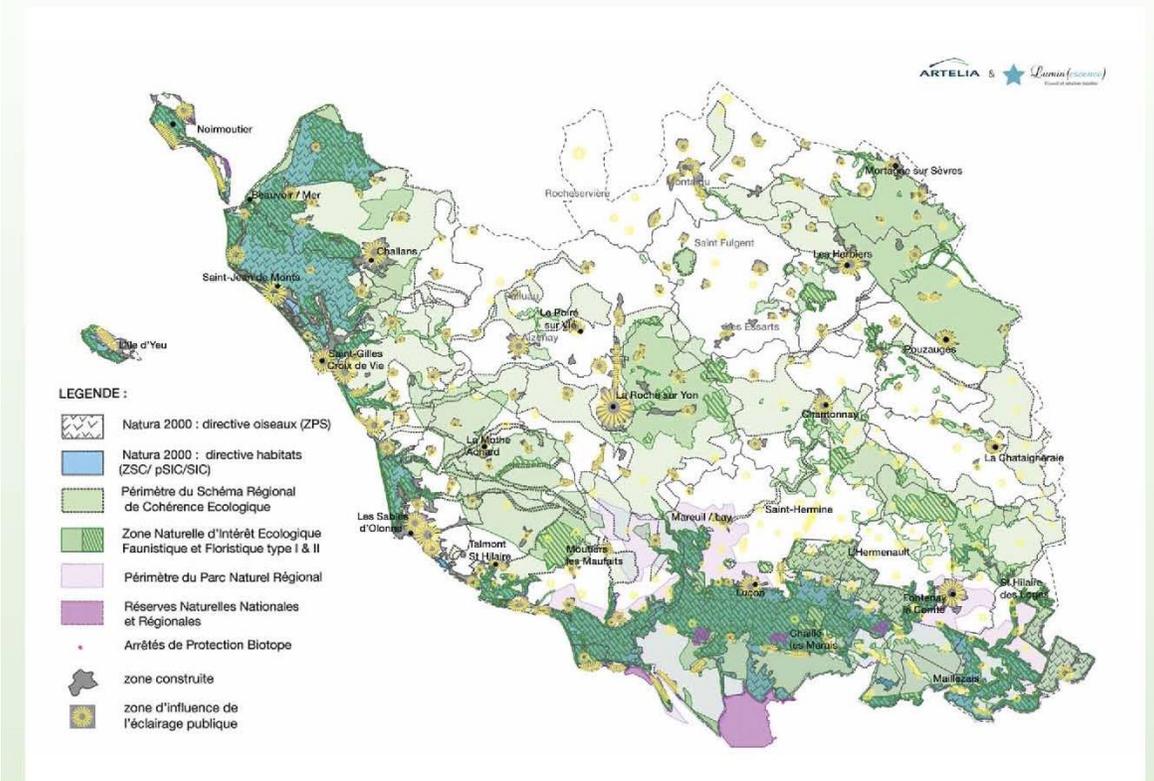
## Genève (Suisse)



Visibilité des sources lumineuses du bassin genevois. Source : [52].



## Département de la Vendée (SyDEV, Artelia, Luminescence)

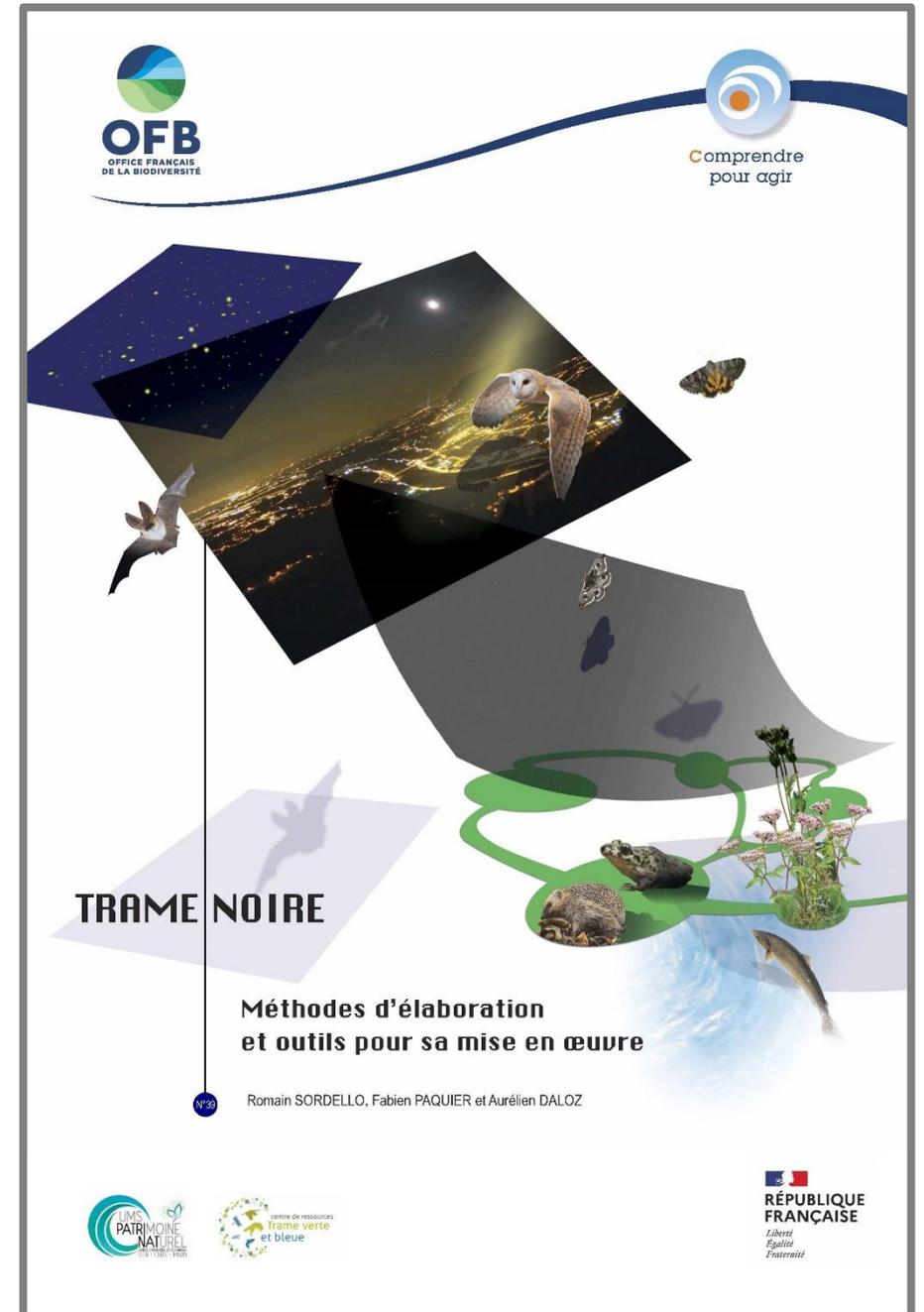


Carte des zones sensibles superposées avec les zones construites et d'influence de l'éclairage public. Source : SyDEV.

Sordello R., Paquier F. et Daloz A. 2021. Trame noire, méthodologie d'élaboration et outils pour sa mise en oeuvre. Office français de la biodiversité. Collection Comprendre pour agir. 112 pages.

## Trame noire, méthodologie d'élaboration et outils pour sa mise en oeuvre

[http://www.trameverteetbleue.fr/sites/default/files/references\\_bibliographiques/guide\\_trame\\_noire\\_ofb\\_ums\\_cpa39\\_mai.pdf](http://www.trameverteetbleue.fr/sites/default/files/references_bibliographiques/guide_trame_noire_ofb_ums_cpa39_mai.pdf)



**MERCI DE VOTRE ATTENTION**

# Ressources écrites

- Effet fragmentant dû à la lumière artificielle :  
[https://www.snl.lu/publications/bulletin/SNL\\_2017\\_119\\_039\\_054.pdf](https://www.snl.lu/publications/bulletin/SNL_2017_119_039_054.pdf)
- Prise en compte de la pollution lumineuse dans la politique publique Trame verte et bleue :  
<https://journals.openedition.org/vertigo/18730>
- Qu'est-ce que la Trame noire (concepts, enjeux, ...) :  
<https://journals.openedition.org/tem/4381>
- Quelques retours d'expérience sur la Trame noire (Parc national des Pyrénées et Lille) :  
<http://www.set-revue.fr/trame-noire-un-sujet-qui-monte-dans-les-territoires>
- Comment gérer l'éclairage dans les continuités écologiques :  
<http://www.set-revue.fr/focus-comment-gerer-la-lumiere-artificielle-dans-les-continuites-ecologiques>

# Ressources vidéos

- MOOC TVB, séquence Trame noire
- Journée Trame noire 26/11/2019 : <http://trameverteetbleue.fr/vie-tvb/groupe-echange-tvb/trame-noire>
- Interview OFB : <https://www.youtube.com/watch?v=rCNXfNM9cm4>
- Conférence Rennes : <https://www.youtube.com/watch?v=K5RF4xl0uv8>
- Conférence Paris : <http://www.arb-idf.fr/article/retour-conference-publique-arb-idf-pollution-lumineuse-et-biodiversite-comment-mettre-en>
- Colloque Cévennes : <https://www.youtube.com/watch?v=RRVow0GnDZU&feature=youtu.be>