© OEIL

Rapport final

Synthèse des connaissances sur les impacts environnementaux de la pollution lumineuse en Nouvelle-Calédonie

Auteurs : Adrien Bertaud, Léa Desoutter
Editeur : OEIL.

Décembre 2022

Observatoire de l'environnement en Nouvelle-Calédonie (OEIL)

contact@oeil.nc | Tél. : +687 23 69 69
31 rue Paul Kervistin – Anse Vata
98 800 Nouméa – Nouvelle-Calédonie

Préambule

Le présent rapport constitue le premier livrable attendu dans le cadre du projet 2020-P-72 financé par le programme européen BEST 2.0+.

L'objectif de BEST 2.0+ est de promouvoir la conservation de la biodiversité, l'utilisation durable des ressources naturelles et des services écosystémiques, y compris pour l'adaptation au changement climatique et l'atténuation de ses effets, dans les Pays et Territoires d'Outre-mer (PTOM) de l'Union européenne. Best 2.0+ cherche à atteindre son objectif en renforçant les autorités locales et les organisations de la société civile qui sont engagées dans le développement local, la conservation de la biodiversité et l'utilisation durable des services écosystémiques dans les PTOM à travers la mise en œuvre d'un mécanisme de subventions qui s'accompagne d'activités de renforcement des capacités. BEST 2.0+ poursuit l'initiative BEST et constitue une suite directe du programme BEST 2.0.

Ce projet BEST2.0+ est financé par l'Union européenne et son bailleur, la Direction générale des partenariats internationaux de la Commission européenne (DG INTPA).

Ce rapport a été réalisé avec le soutien financier de l'Union européenne. Son contenu relève de la seule responsabilité de l'OEIL et ne reflète pas nécessairement les opinions de l'Union européenne.

Citation du rapport : Synthèse des connaissances sur les impacts environnementaux de la pollution lumineuse en Nouvelle-Calédonie. Rapport de l'Observatoire de l'environnement en Nouvelle-Calédonie-OEIL. 70 pages. Adrien Bertaud, Léa Desoutter. 2022

Table des matières

1. Introduction 4
   1.1. Objectifs du document 5
   1.2. Définition de la pollution lumineuse et généralités 5
2. Méthode de travail 8
3. Caractérisation de la pollution lumineuse en Nouvelle-Calédonie 8
   3.1. Informations relatives aux travaux publiés 8
   3.2. Données sur l'éclairage 11
   3.3. Informations issues de la télédétection 12
   3.4. Mesures *in situ* 14
   3.5. Autres informations utiles 15
4. Impacts environnementaux de la pollution lumineuse 15
   4.1. En Nouvelle-Calédonie 15
      4.1.1. Oiseaux marins 15
      4.1.2. Tortues marines 31
      4.1.3. Chiroptères 32
   4.2. Dans le monde 34
      4.2.1. Compartiments de la biodiversité concernés 34
      4.2.2. Influence de la nature des sources lumineuses 42
      4.2.3. Niveaux d'organisation biologiques concernés 45
   4.3. Mise en perspective du contexte de la Nouvelle-Calédonie 50
5. Mesures de gestion relatives à la pollution lumineuse en Nouvelle-Calédonie 51
   5.1. Textes et règlementation 51
   5.2. Autres mesures de gestion 58
6. Discussion et synthèse 58
7. Conclusion 62
8. Bibliographie 63

1. Introduction

A l'échelle mondiale, le développement des zones urbaines, de l'électrification des pays en voie de développement et l'intensification des activités humaines engendrent une augmentation croissante de l'usage d'éclairages artificiels. En 2016, la publication de l'atlas Mondial de la pollution lumineuse révélait que 83% de la population mondiale vit dans des ciels pollués par la lumière artificielle. Cela concernait alors plus de 99% de la population des états unis et d'Europe. L'étude estimait également que plus d'un tiers de l'humanité ne pouvait pas voir la voie lactée (FALCHI *et al.* 2016).

Dans les années 70, ce sont les astronomes qui ont commencé à exprimer leur préoccupation concernant la pollution lumineuse croissante qui venait compliquer, voire rendre impossible, l'observation des objets célestes les moins lumineux. Depuis, le phénomène est devenu une préoccupation plus globale considérant ses répercussions importantes sur la santé humaine, la faune et la flore. Le pouvoir perturbateur des lumières artificielles sur la faune et la flore est décrit par les scientifiques depuis plus d'un siècle. Ainsi, des phénomènes de collision des oiseaux avec des infrastructures illuminées ou un retard dans la chute des feuilles d'arbres à feuillage caduques à proximité de lampadaires, sont connus depuis plusieurs décennies. Cependant, ce n'est que récemment, depuis les années 2000 que les scientifiques commencent à s'intéresser à des effets beaucoup plus subtils comme la perturbation des migrations ou des cycles de reproduction.

Avec une démographie en augmentation quasi constante depuis ces 50 dernières années et une urbanisation croissante, la Nouvelle-Calédonie doit également prendre en considération cette nouvelle préoccupation environnementale. Abritant près d'un tiers des récifs vierges de la planète, avec 6 sites marins inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO, une zone humide inscrite sur la convention RAMSAR, une diversité et un taux d'endémicité floristique parmi les plus importants au monde (80%) et de nombreuses espèces rares et menacées, l'archipel reconnu comme un des hotspots de la biodiversité mondiale, se voit confier l'importante responsabilité de préserver un patrimoine naturel unique.

Dans ce contexte, l'Observatoire de l'environnement en Nouvelle-Calédonie – OEIL a initié en juillet 2021 une étude visant à fournir une première caractérisation de la pollution lumineuse en Nouvelle-Calédonie et à formuler les premières recommandations pour orienter les actions des gestionnaires, avec le support financier du programme européen BEST 2.0+.
Baptisé Pollux NC, le projet mené prévoit plusieurs étapes de travail avec :

- La réalisation d'une synthèse des connaissances concernant les impacts de la pollution lumineuse en Nouvelle-Calédonie. **C'est l'objet du présent rapport.**
- La production de cartes de la pollution lumineuse à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie et à l'échelle de sites particuliers.
- La réalisation de mesures *in situ* de la qualité du ciel nocturne sur quelques sites.
- La production d'un rapport d'étude complet incluant l'analyse des résultats et la formulation de recommandations pour la prise en compte de la pollution lumineuse dans les politiques publiques locales.

1.1. Objectifs du document

Le présent document vise principalement à recenser et synthétiser les informations existantes concernant les impacts environnementaux liés à la pollution lumineuse en Nouvelle-Calédonie (faune, flore, écosystèmes). La situation locale est également mise en perspective avec les connaissances disponibles au niveau international.

Enfin, un point concernant les informations disponibles en Nouvelle-Calédonie pour décrire les émissions lumineuses est réalisé ainsi qu'une description des mesures de gestion de la pollution lumineuse identifiées.

Les aspects relatifs aux impacts sanitaires de la pollution lumineuse ne sont pas traités dans le cadre du projet.

1.2. Définition de la pollution lumineuse et généralités

Il existe différentes définitions de la pollution lumineuse, aussi appelée photopollution, dans la littérature scientifique.

Étant un phénomène principalement décrit par les astronomes dans un premier temps, la pollution lumineuse désignait avant tout une dégradation des conditions d'observations astronomiques, où les objets célestes les moins lumineux ne sont plus visibles. Aujourd'hui, la notion a été élargie a des considérations sanitaire ou écologique, la dernière étant celle qui nous intéresse.

En 1985, Verheijen désigne la « photopollution » comme l'ensemble des « lumières artificielles ayant des effets négatifs sur la vie sauvage ».

René Kobler, architecte et ingénieur en environnement, a définit la pollution lumineuse en 2002 comme étant « le rayonnement lumineux infrarouge, UV et visible émis à l'extérieur ou vers l'extérieur, et qui par sa direction, intensité ou qualité, peut avoir un effet nuisible ou incommodant sur l'homme, sur le paysage ou les écosystèmes ».

En 2004, Longcore et Rich distingue la « pollution lumineuse astronomique », qui altère les observations, de la « pollution lumineuse écologique » qui « altère les régimes de luminosité naturelle dans les écosystèmes terrestres et aquatiques ». Cette pollution lumineuse « correspond notamment à une augmentation chronique ou périodique de la luminosité, à des changements soudains de la luminosité et à une exposition directe à un faisceau lumineux ».

L'Institut italien de la technologie et de la science de la pollution lumineuse (ISTIL- Istituto di Scienza e Tecnologia dell'Inquinamento Luminoso) défini plus sobrement le phénomène de pollution lumineuse comme « l'altération des niveaux naturels de luminosité causés par des sources lumineuses anthropiques ».

Plusieurs types de nuisance de l'environnement nocturne résultent de la pollution lumineuse. Ainsi, on peut distinguer :

- L'augmentation de la luminescence du ciel provoquée par la diffusion de la lumière artificielle dans l'atmosphère, phénomène à l'origine de la formation d'un halo lumineux au dessus des villes qui vient altérer la visibilité des étoiles et autres objets célestes ;
- La sur-illumination qui se traduit par une luminosité anormale de l'environnement la nuit ;
- L'éblouissement causé par un éclairage direct d'une source lumineuse.

Les quatre principaux facteurs évoqués dans la littérature et qui vont influencer l'effet de la lumière artificielle sur le vivant sont :

- La quantité de lumière émise, qui est souvent associée au flux lumineux et/ou à l'intensité lumineuse ;
- Les longueurs d'onde émises, qui conditionnent le spectre ou la composition de la lumière. La notion de température de la couleur de la lumière est également liée aux longueurs d'ondes : plus la longueur d'onde est importante plus la température de la couleur est qualifiée de « chaude » (couleur proche du rouge – orange), plus la longueur d'onde est faible et plus la température de la couleur est qualifiée de « froide » (couleur proche du bleu - violet) ;
- La direction de diffusion de la lumière, conditionnée notamment par le type et l'orientation des éclairages ;
- La réflexion de la lumière sur tout support, objet, ou élément éclairé.

Les éléments relatifs aux types de nuisances et aux facteurs qui influencent l'effet de la lumière sur le vivant sont exposés dans le document relatif aux « Pistes méthodologiques pour prendre en compte la pollution lumineuse dans les réseaux écologiques » de SORDELLO R. (2017) et repris dans le schéma ci-dessous.

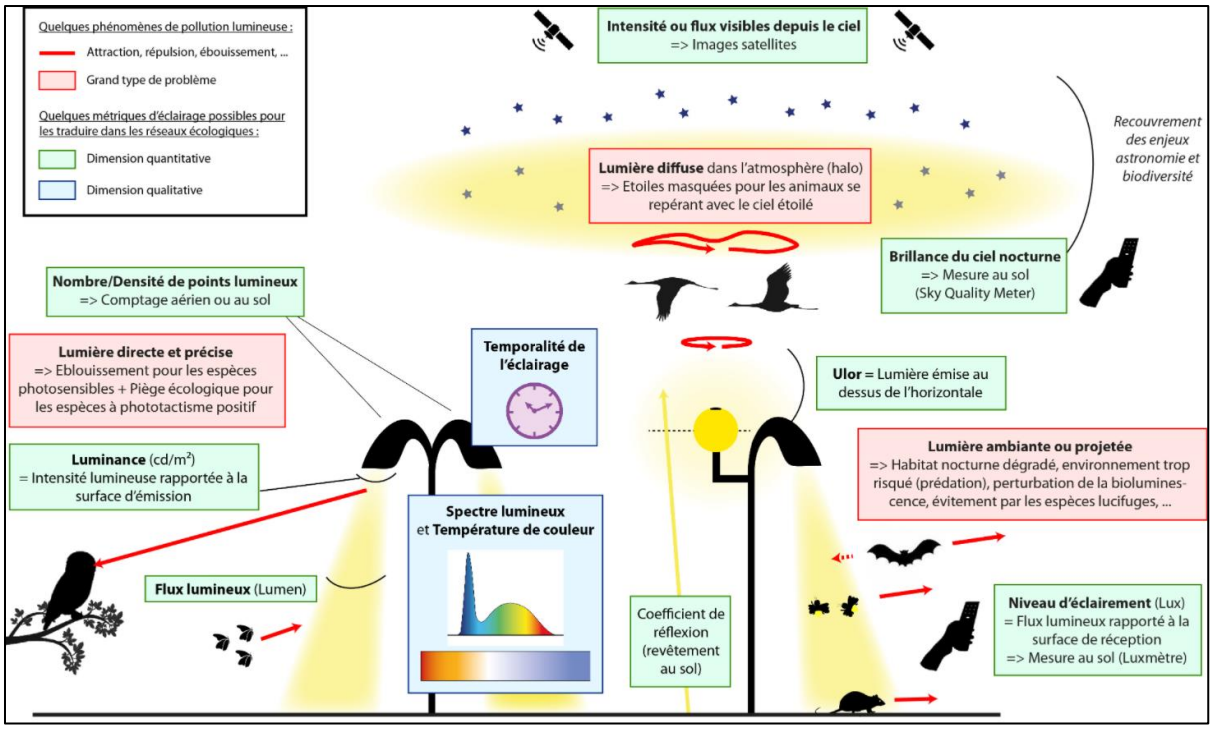


Figure 1 : Schéma extrait de SORDELLO R. (2017) et présentant les principaux types de nuisances désigné comme « Grand type de problème » (boites rouges).

Les sources de lumière artificielle les plus communément évoquées comme contributrices au phénomène de pollution lumineuse correspondent :

- Aux réseaux d'éclairage public (lampadaires notamment) ;
- Aux éclairages des bâtiments et du patrimoine culturel (ex : immeubles, monument) ;
- Aux vitrines et enseignes des commerces ;
- À des activités industrielles (ex : usines, serres agricoles) ;
- Aux lumières des habitations (ex : éclairage de façade, jardin) ;
- Au trafic routier et maritime.

FALCHI *et al*. qui ont produit l'atlas mondial de la pollution lumineuse en 2016, identifient les sources de lumière qui structurent les conditions naturelles de luminosité comme étant :

- La lune,
- Les étoiles et la voie lactée,
- La lumière du ciel nocturne ou lueur de l'air (« airglow » en anglais),
- La lumière zodiacale.

Ce sont donc ces sources de lumière nocturnes qui ont conditionnées durant des centaines de millions d'années le développement et l'évolution des espèces sur Terre en assurant des fonctions structurantes décrites au travers des constats suivants :

- **La lumière est une information spatio-temporelle**. Elle peut notamment rythmer le fonctionnement physiologique des organismes (ex : cycle de reproduction, activité

endocrinienne), guider leurs déplacements dans l'espace (ex : migration) et leurs comportements (ex : activité d'alimentation).

- **La lumière structure l'environnement nocturne.** Elle joue notamment un rôle dans la détermination des espaces favorables aux espèces en fonction de leur preferendum (ex : des proies potentielles vont préférer des zones peu éclairées) et dans la perception des couleurs qui intervient notamment dans l'activité d'alimentation de certaines espèces (ex : perception des plantes par les insectes).

- **La lumière est une source d'énergie.** Le métabolisme des producteurs primaires est directement en lien avec la lumière et par conséquent, toute la chaine trophique associée en dépend.

2. Méthode de travail

La réalisation de ce document repose sur l'exploitation d'un fond documentaire constitué lors de recherches bibliographiques sur différents plateformes accessibles depuis le web (Centre de ressources numérique de l'OEIL, Horizon – IRD, Archives ouvertes HAL, Google scholar…) et également grâce à des échanges avec divers acteurs locaux.
Au total, une quarantaine de personnes appartenant à 20 structures ont été contactées dans le cadre de ce travail.
Les organismes concernés rassemblent des associations de protection de l'environnement, des ONG, des structures de recherches et les collectivités.

3. Caractérisation de la pollution lumineuse en Nouvelle-Calédonie

Cette partie du document vise à identifier toutes les informations potentiellement disponibles et permettant de caractériser la pollution lumineuse en Nouvelle-Calédonie. Cinq grands types d'informations ont été recensés :

- Les informations issues de travaux scientifiques publiés décrivant le phénomène de pollution lumineuse dans le monde et notamment en Nouvelle-Calédonie,
- Les données concernant l'éclairage détenues localement par les acteurs du territoire,
- Les informations issues de la télédétection,
- Les mesures *in situ* à l'aide d'instruments dédiés,
- Les informations contextuelles qui peuvent être utilisées.

3.1. Informations relatives aux travaux publiés

Plusieurs études concernant des approches à l'échelle mondiale et donc concernant la Nouvelle-Calédonie, ont été identifiées. Il s'agit en premier lieu de la production des deux atlas mondiaux de la luminosité artificielle du ciel nocturne publiés en 2001 puis en 2016 :

- The first world atlas of the artificial night sky brightness. CINZANO *et al*. 2001
- The new world atlas of artificial night sky brigthness. FALCHI *et al.* 2016

Les atlas mondiaux reposent sur l'exploitation d'informations satellitaires. En 2001, se sont les informations du capteur OLS (Operational Linescan System) embarqué sur les satellites du DMSP - Defense Meteorological Satellite Program de la NOAA qui ont été exploitées. Ce capteur fourni des données de luminance énergétique (radiance en anglais). Les données exploitées reposent sur un échantillon d'images sans nuage correspondant à un total de 28 nuits sur la période 1996 – 1997. La carte produite correspond à la luminosité artificielle du ciel perçu au niveau de la mer dans le spectre du visible (bande V du système photométrique).
En 2016, les informations du capteur VIIRS embarqué sur le satellite Suomi NPP de la NASA ont été exploitées pour produire une carte de la luminosité artificielle du ciel nocturne relativement comparable dans ses caractéristiques au premier atlas publié en 2001, à la différence de la résolution des données exploitées qui est améliorée grâce à la meilleure précision des informations provenant du VIIRS. La résolution spatiale des informations est 4 fois plus précise (742 m le pixel pour VIIRS contre un pixel d'environ 2,7 km pour OLS). Les données exploitées pour la production de la carte correspondent aux données de luminance sur les mois de mai, juin, septembre, novembre et décembre 2014.
L'atlas de 2016, indique qu'en 2014, 92,4 % de la population de Nouvelle-Calédonie vivait sous un ciel nocturne perturbé par la pollution lumineuse avec des niveaux élevés de pollution lumineuse pour 48,4% de la population (Brillance du ciel > 688 µcd/m² contre < 1,7 µcd/m² pour une zone hors influence). La surface concernée par ce fort niveau de brillance ne concernait que 0,6 % du territoire.

Country	Brightness (µcd/m^2)											
	≤1.7	>1.7	>14	>87	>688	>3000	≤1.7	>1.7	>14	>87	>688	>3000
	Population (%)						Area (%)					
New Caledonia*	7.6	92.4	79.2	67.2	48.4	0.0	38.9	61.1	16.3	3.9	0.6	0.0

Figure 2: Pourcentage de population et de surface en fonction de la brillance artificielle du ciel. Le niveau de référence étant fixé à moins de 1,7 µcd/m². (Figure extraite de FALCHI et al. 2016).

La carte suivante correspond à un aperçu de la Nouvelle-Calédonie dans l'atlas mondial de la luminosité artificielle du ciel nocturne publié en 2016, consulté depuis l'interface en ligne : https://www.lightpollutionmap.info/

Figure 3: extrait de l'atlas mondial de la luminosité artificielle du ciel nocturne en 2016 (source : FALCHI et al. 2016 et www.lightpollutionmap.info)

A noter qu'en 2022, David Lorenz, chercheur associé du centre de recherche pour le climat à l'Université du Winsconsin-Madison, a reproduit la méthode publiée par CINZANO *et al*. 2001 pour générer un atlas Mondial de la pollution lumineuse en exploitant les données VIIRS 2020. Ces travaux ne semblent pas avoir fait l'objet d'une publication soumise à un comité de relecture. Les résultats sont diffuses par l'auteur sur open street map avec une carte des niveaux de luminance 2020 ainsi qu'une carte de tendance d'évolution sur la période 2014-2020 (sources: https://djlorenz.github.io/astronomy/lp2020/overlay/dark.html).

Deux autres études dédiées à l'analyse de l'influence de la pollution lumineuse sur les aires protégées au niveau mondial concernant la Nouvelle-Calédonie ont été identifiées :

- Global assessment of light pollution impact on protected areas. AUBRECHT *et al.,* 2010
- Evaluation of Light Pollution in Global Protected Areas from 1992 to 2018. MU *et al*., 2021

La première étude a consisté en l'analyse de l'influence de la luminosité artificielle sur les aires protégées dans le monde en utilisant les données du capteur OSL fournit par le DMSP pour l'année 2003 (données sans nuage) et les informations relatives aux aires protégées issues de la base de données mondiale sur les aires protégées (World Database on Protected Areas - WDPA). Trois indicateurs ont été renseignés : un indicateur relatif au pourcentage de surface classée en aire protégée (« Protected Arera Index - PAI »), un indicateur relatif à la proportion des aires protégées exposées à une luminosité artificielle (Protected Area Light Pollution Index (PALI)) et un indicateur plus global relatif à la proportion des aires protégées exposées aux impacts des activités humaines, toujours basé sur l'exploitation des données de luminosité (« Protected Area Human Impact Index - PAHI »). En 2003, sur la Nouvelle-Calédonie, l'étude relève la présence d'une influence des activités humaines sur 32,7% des aires protégées du pays basé sur l'analyse des données de luminosité (PAHI). L'indicateur

PALI correspondant à la proportion des aires protégées exposée à une luminosité artificielle (même faible) révèle que 6,5% des aires protégées étaient directement exposées. A titre de comparaison, les chiffres obtenus à Fiji sont assez proches.

Country	Code	Land area [km²]	PAI [%]	PALI [%]	PAHI [%]
World*		**129,980,271.5**	**12.7**	**1.8**	**8.6**
New Caledonia	NCL	18,347.7	5.5	6.5	32.7
Fiji Islands	FJI	17,504.9	1.3	8.2	23.8

Figure 4: Résultats relatifs aux indicateurs PAI, PALI et PAHI obtenus pour la Nouvelle-Calédonie et Fidji en 2003 (figure extraite de AUBRECHT et al., 2010)

La seconde étude analyse la tendance d'évolution de la lumière artificielle la nuit et son influence sur les aires protégées au niveau mondial. Une chronique de données satellitaires sur la période 1992 – 2018 est exploitée, il s'agit des informations relatives à la luminance qui proviennent des capteurs OLS (DMSP) et VIIRS (Suomi). Les données relatives aux aires protégées (étendue spatiale, statut localisation) proviennent de la base de données mondiale sur les aires protégées (WDPA). L'étude garde des approches relativement régionales dans l'analyse des résultats et la Nouvelle-Calédonie n'est pas spécifiquement traitée. Elle semble incluse dans la région Océanie, au même titre que l'Australie et la Nouvelle-Zélande. La situation de l'Océanie décrite, montre que pour 45% des aires protégées sur la période 1992-2018, il y aurait une augmentation de la luminosité artificielle. L'analyse de la corrélation du phénomène avec l'évolution de l'imperméabilisation des sols permet aux auteurs d'incriminer l'urbanisation comme le principal facteur de cette évolution. Les aires protégées les plus affectées par la lumière artificielle sont situées en Europe, en Amérique du Nord et en Asie du Sud-Est, bien que de légères diminutions de la luminosité artificielle soient mentionnées pour les Etat Unis et le Japon.

Les résultats des différents travaux identifiés et menés à l'échelle mondiale, s'ils permettent de fournir quelques éléments sur le contexte de la Nouvelle-Calédonie et d'effectuer des comparaisons avec d'autres territoires, traduisent bien la nécessité de mener des caractérisations et une étude précise au niveau local pour disposer de données qui soient exploitables et pouvoir entamer une quelconque gestion du phénomène. Les limites de ces travaux à de larges échelles spatiales ne permettent pas de prendre en compte les spécificités locales du territoire comme le taux d'humidité pouvant influer sur la diffusion de la lumière dans l'atmosphère (DEVERCHERE & VAUCLAIR, 2019).

3.2. Données sur l'éclairage

Plusieurs sources de données relatives au positionnement des éclairages publics et privés ont été identifiées durant nos échanges avec les acteurs locaux.

Ainsi, les principaux détenteurs d'informations identifiés sont :

- Les mairies qui peuvent disposer de bases de données de l'éclairage public. Ces bases de données ont parfois été consolidées par les opérateurs des réseaux électriques avant d'être transmises aux mairies. Certaines mairies gèrent leur base de données en régie tandis que d'autres délèguent cette tache aux opérateurs des réseaux électriques. Nous n'avons pas de

visibilité sur la nature exacte des informations qui peuvent être contenues dans l'ensemble des bases de données communales existantes.

- Les opérateurs des réseaux électriques : EEC-Engie et ENERCAL. Dans le cadre de l'exploitation de leurs concessions, ces entreprises ont consolidé des bases des données, notamment en lien avec l'éclairage public des communes. Les données dont ils disposent semblent être les plus exhaustives puisqu'une grande variété d'éclairages y sont recensés : lampadaires, éclairages au sol…
- Les provinces consolident des données topographiques dans le cadre de la gestion de leurs infrastructures. A ce titre, elles disposent d'informations sur le positionnement des candélabres et lampadaires et des supports électriques (poteaux électriques) potentiellement porteurs d'éclairages.
- Le GIE SERAIL NC est une société privée qui gère pour le compte de ses membres des informations géographiques numérisées concernant le sol et le sous-sol des zones urbanisées. A ce titre, le GIE SERAIL NC dispose de données relatives au positionnement des candélabres et lampadaires et des supports électriques (poteaux électriques) de plusieurs communes de Nouvelle-Calédonie.
- Les principaux aménageurs comme la SECAL, la SAEML NORD AMÉNAGEMENT, la SIC disposent d'informations relatives aux éclairages employés dans leurs aménagements.
- Les entreprises privées, notamment impliquées dans la métallurgie disposent de données relatives aux éclairages sur les sites d'exploitation industrielle et minière.

Les échanges tenus avec les différents détenteurs d'information traduisent l'existence d'une certaine hétérogénéité dans les informations disponibles. Le positionnement des éclairages est l'information de base généralement disponible mais les informations relatives à l'intensité des équipements, l'orientation du flux lumineux, le type d'éclairage (Lampe à sodium, LED…), la température de couleur etc. sont des informations qui semblent partiellement référencées. Aucune source d'information permettant de caractériser précisément les éclairages provenant des habitations de particuliers ou les enseignes lumineuses n'a été identifiée.

3.3. Informations issues de la télédétection

L'usage de la télédétection est reconnu comme étant une méthode pertinente de caractérisation de bon nombre de pressions environnementales et la pollution lumineuse ne fait pas exception.

Les principales sources identifiées dans la bibliographie comme permettant de fournir de l'information sur la luminosité artificielle du ciel nocturne sont présentées ci-après :

- Le Capteur OLS (Operational Linescan System) embarqué sur les satellites du DMSP - Defense Meteorological Satellite Program de la NOAA. Ce capteur a permis de collecter des données de luminance dans le monde sur la période 1992 – 2013. Il n'est plus en exploitation aujourd'hui. La résolution spatiale des informations est de 2,7 Km.
- Le capteur VIIRS embarqué notamment sur le satellite Suomi NPP de la NASA. Cet instrument collecte des données de luminance dans le monde depuis 2012 et il est encore en exploitation. La résolution spatiale des informations collectées est de 740 mètres.

- La constellation JILIN-1 de la société chinoise Chang Guang Satellite qui rassemble une douzaine de satellites permet de réaliser des images satellitaires nocturnes sur commande. La résolution spatiale des images fournies est proche d'un mètre par pixel en moyenne (variation en fonction des satellites concernés) ce qui constitue l'une des résolutions les plus précises du marché.
- Les images provenant d'appareils photo reflex numériques prises depuis la Station Spatiale Internationale – ISS. Les photographies effectuées par les astronautes depuis l'ISS sur la période 2002 à 2018 représentent 3 millions de clichés dont 1,34 millions ont été pris la nuit. Les images diurnes et nocturnes de la NASA, la CSA-ASC et de l'ESA sont stockées dans les archives de la NASA et accessibles au lien suivant : https://eol.jsc.nasa.gov/. Une recherche avec le mot clé « New Caledonia » indique l'existence de 801 dossiers photographiques avec des dates d'acquisitions qui vont de 1975 à 2021. Dans SANCHEZ DE MIGUEL *et al.* (2021), l'intérêt des images nocturnes capturées depuis l'ISS est spécifiquement abordé. Les caractéristiques de ces images dépendent naturellement de celles des appareils utilisés et des modalités de capture (angle etc.).

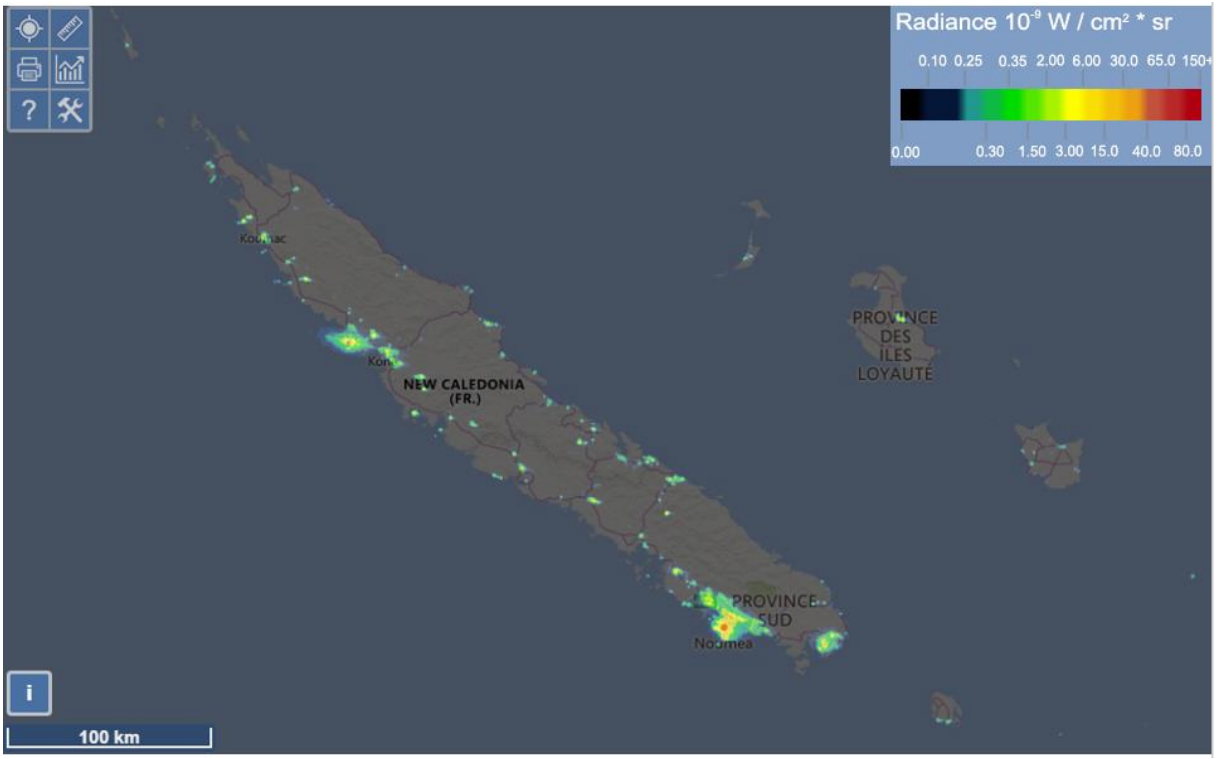


Figure 5: aperçu des données de luminances capturées par le capteur VIIRS en 2021 en Nouvelle-Calédonie. Cette capture d'écran est effectuée depuis le site https://www.lightpollutionmap.info/

Figure 6: cliché photographique pris depuis la Station Spatiale Internationale – ISS le 03/06/2020, référence : ISS055-E-114757, téléchargée depuis https://eol.jsc.nasa.gov/

3.4. Mesures *in situ*

Certains appareils permettent d'effectuer des mesures de la luminosité depuis le terrain. Il existe 3 catégories d'instruments qui peuvent être employés :

- Les Sky Quality Meter (SQM) ;
- Les luxmètres et luminancemètres ;
- Certaines applications de téléphone comme « Dark Sky Meter ».

Les avantages et inconvénients de chacun de ces instruments sont bien discutés dans les directives nationales concernant la pollution lumineuse et la faune sauvage d'Australie (« National Light Pollution Guidelines for Wildlife, Australian government, 2020).

Durant nos échanges, nous avons identifié que certains relevés terrain ont pu être effectués en Nouvelle-Calédonie pour des caractérisations ponctuelles. Ces mesures sont notamment fréquemment employées par les amateurs d'astronomie comme les membres de l'Association Calédonienne d'Astronomie – ACA. Des caractérisations de la qualité du ciel ont également pu être menées pour des projets privés (Comm. pers. ACA).
A noter qu'il existe à l'échelle internationale des initiatives de réseau participatif de mesure de la luminance.

3.5. Autres informations utiles

Au-delà, des sources d'informations évidentes que sont les données relatives à l'éclairage ou les mesures de la qualité du ciel nocturne, différents travaux ont permis de déterminer des méthodes de modélisation de la pollution lumineuse à partir de données contextuelles.
Ainsi, dès 1977, Walker établissait une équation pour lier la densité de population à la brillance du ciel nocturne. La littérature récente qui s'intéresse au sujet évoque encore les lois de Walker. Cette donnée de base concernant la répartition spatiale de la population, notamment via les informations collectées lors des recensements effectués par l'ISSE, pourrait donc être utilisée pour effectuer des modélisations de la pollution lumineuse en Nouvelle-Calédonie. Les modèles existants, qui se sont complexifiés depuis 1977, peuvent faire intervenir d'autres données exogènes telles que le mode d'occupation du sol ou la composition atmosphérique.

Selon l'expertise du bureau d'étude Dark Sky Lab (DEVERCHERE & VAUCLAIR, 2019), c'est généralement une approche consistant à mixer les sources d'informations (ex : données de luminance satellitaire et données d'éclairage) qui permet d'obtenir la caractérisation la plus exhaustive et pertinente du phénomène.

Sources :

- SOLANO LAMPHAR H. A., (2018). The emission function of ground-based light sources: state of the art and research challenges.
- DEVECHERE P., VAUCLAIR S., (2019). Modélisation de la pollution lumineuse à partir de données de radiance satellite.
- CHALLEAT S., (2007). Cartographie de la pollution lumineuse zénithale en Bourgogne à partir de données de population et d'occupation du sol.

4. Impacts environnementaux de la pollution lumineuse

4.1. En Nouvelle-Calédonie

Les connaissances relatives aux impacts de la pollution lumineuse sur la biodiversité de Nouvelle-Calédonie sont présentées dans les parties suivantes. Les recherches n'ont permis d'identifier que trois groupes faunistiques pour lesquels les effets de la pollution lumineuse sont rapportés : les oiseaux marins, les tortues marines et les chiroptères.

4.1.1. Oiseaux marins

C'est le groupe faunistique pour lequel les informations relatives aux impacts de la pollution lumineuse sont les plus étoffées. En effet, il s'agit d'un groupe particulièrement sensible et les « échouages »

d'oiseaux marins que l'on retrouve divaguant dans des zones éclairées, qu'elles soient urbaines, industrielles ou autre, est une scène malheureusement assez commune en Nouvelle-Calédonie.

Différentes initiatives dédiées à l'analyse et au suivi de l'impact des éclairages sur les oiseaux marins ont été / sont menées en Nouvelle-Calédonie. Ci-dessous, nous présentons les principaux travaux identifiés :

- ***Etudes mandatées par la société industrielle et minière Le Nickel – SLN***

Trois études distinctes ont été commanditées par la SLN et visaient notamment à décrire les impacts de la pollution lumineuse sur les oiseaux marins sur leurs sites miniers et émettre des recommandations de gestion. Ces études ont notamment permis de décrire les perturbations des oiseaux marins sur deux sites miniers de la SLN situés sur les massifs de Tiébaghi et de Kopéto.

La première étude identifiée a été réalisée en 2011 sur le site de Tiébaghi et correspondait à un stage de fin de cursus d'un élève ingénieur (Julien Pantz). L'objet du stage était de qualifier l'impact lié à la pollution lumineuse, de produire un audit des éclairages et de formuler des recommandations. Les observations réalisées dans le cadre de cette étude ont répertorié 11 échouages de puffin fouquet ou puffin du pacifique (*Puffinus pacificus chlororhynchus*) qui sont attribués à la pollution lumineuse sur le site.

Les autres études ont été menées par l'IRD de Nouvelle-Calédonie sur la période 2012 – 2016.

La première étude identifiée correspondait à l'étude de l'impact de la prédation des chats harets et de la pollution lumineuse sur les colonies de pétrels et de puffins.
Elle s'est déroulée sur une période de 30 mois avec une première phase de diagnostic et de quantification des phénomènes (2012-2013) puis une phase d'évaluation des mesures correctives mises en place pour la modification des éclairages et le contrôle des espèces envahissantes. Les opérations de caractérisation de l'impact de la pollution lumineuse se sont concentrées sur la période d'envol des jeune (15 jours durant mai – juin) et ont consisté en des observations des déplacements des oiseaux marins à proximité des sites effectuées la nuit à l'aide de jumelles (normales et à vision nocturne). Ces observations ont été complétées par une enquête auprès des agents des sites de Kopéto et Tiébaghi pour recueillir leurs observations sur les échouages.

A Tiébaghi, Les observations de terrain effectuées par les équipes n'ont permis de constater aucune collision. Trois cadavres d'oiseaux identifiés comme des pétrels de Tahiti (*Pseudobulweria rostrata trouessarti*) ont été relevés et la mort attribuée à une collision avec le matériel d'éclairage. L'enquête à quant à elle mis en évidence 12 échouages de puffin fouquet. A Kopéto, aucune mortalité ou collision n'ont été constatées durant les observations et l'enquête, cependant, une collision antérieure à l'étude a été rapportée pour un puffin fouquet.

L'étude conclue à un phénomène de collision dû aux éclairages qui serait plutôt ponctuel, ce qui explique la difficulté à le constater durant les observations. La recherche des cadavres ou d'individus désorientés après collision est probablement biaisée par la présence de chats harets sur les sites qui sont des prédateurs de ces oiseaux et profitent de leur présence au sol pour les capturer et les consommer à l'abri des regards. L'étude confirme que la saison des échouages pour le puffin fouquet se situe autour des mois de mai et juin, période post-reproduction lors de l'envol des jeunes. Pour le

pétrel de Tahiti, il ne semble pas y avoir de saison précise concernant les échouages, l'espèce semble se reproduire toute l'année.

A noter que l'effet des mesures correctives sur les éclairages n'a pas pu être évalué car les modifications de l'éclairage n'ont pas été réalisées dans les temps.

La dernière étude identifiée s'est déroulée sur la période 2015-2016 et visait à décrire les populations de pétrels de Tahiti et la pression des chats harets sur cette espèce. Bien que ces travaux n'abordaient pas spécifiquement l'impact de la pollution lumineuse, les résultats de l'étude rapportent pour le site de Camps de sapins à Thio une probable raréfaction des pétrels de Tahiti due aux perturbations liées aux activités minières et aux espèces exotiques envahissantes (chats, cochons et cerfs). La pollution lumineuse combinée à la forte nébulosité de ce site situé en altitude (>800m) sont évoqués parmi les facteurs de causalité.

Sources :

- PANTZ J., (2011). Pollution lumineuse sur le site de Thiébaghi. Impacts, quantification et préconisations.
- IRD, 2013. Recherches sur l'impact écologique de deux perturbations d'origine anthropique (espèces invasives et éclairage de site) sur les populations de pétrels et de puffins de sites miniers. Complément : Préconisations générales d'atténuation de l'impact des deux perturbations d'origine anthropique sur les sites SLN de Kopéto et Tiébaghi.
- IRD, (2013) Recherches sur l'impact écologique de deux perturbations d'origine anthropique (espèces invasives et éclairage de site) sur les populations de pétrels et de puffins de sites miniers. Rapport intermédiaire
- IRD, (2015) Recherches sur l'impact écologique de deux perturbations d'origine anthropique (espèces invasives et éclairages de site) sur les populations de pétrels et de puffins de sites miniers. Complément : Recherche sur l'atténuation expérimentale de l'impact de deux perturbations d'origine anthropique sur les sites SLN de Kopéto et Tiébaghi. Rapport final.
- IRD, (2015). Poursuite des travaux de recherche engagés sur (i) l'écologie et l'impact des populations de chats harets et (ii) la connaissance et la conservation des colonies de Pétrels en massifs miniers. Compte-rendu intermédiaire.
- IRD, (2015). Mise en oeuvre de prospections légères et rapides des populations de Pétrels au niveau de massifs de la SLN par récolte et analyse des fèces de chats harets et recherche de la présence de restes de pétrels prédatés. Compte-rendu de mission pour les sites de Poum, Opoué, Thio Plateau.
- IRD, (2016). Suivi des populations de Pétrels de Tahiti Pseudobulweria rostrata du massif de Tiébaghi, site de la Société LE NICKEL SLN.
- IRD, (2016). Poursuite des travaux de recherche engagés sur (i) l'écologie et l'impact des populations de chats harets et (ii) la connaissance et la conservation des colonies de Pétrels en massifs miniers. Rapport final - 1ère version.

- ***<u>Le programme TANSLOC-PETRELS du CNRT</u>***

Ce programme de recherche financé par le CNRT avait pour objet de conduire une étude de faisabilité pour la mise en œuvre d'opérations de translocation de pétrels de Tahiti (et potentiellement l'autre espèce fréquentant les massifs miniers pour nidifier : le pétrel de Gould*, Pterodroma leucoptera caledonica*) depuis des zones pouvant être impactées par les activités minières vers des zones hors d'influence. L'étude publiée en 2019 s'est notamment appuyée sur des expériences de translocations de procellaridés menées à l'international et sur les connaissances terrain de sites candidats en Nouvelle-Calédonie (Massif de Koniambo).

Bien que l'étude ne ciblait pas les impacts de la pollution lumineuse, « le fort éclairage à la nuit tombée » constaté sur le massif du Koniambo est identifié comme un facteur de perturbation majeur pour le pétrel de Tahiti. Cette perturbation combinée avec le bruit et la poussière sont également identifiés comme les causes probables de la diminution de l'activité vocale des oiseaux sur la période 2013-2018 (implicitement de leur abondance) dans un secteur adjacent à la mine.

Source :

BOURGEOIS K., DROMZEE S., PAGENAUD A., CHAGNEAU G., LE CORRE M., VIDAL E. (2019). Étude de faisabilité du déplacement de colonies de pétrels sur massifs miniers : rapport scientifique final.

- ***Étude des populations de pétrels de Tahiti sur le massif du Konimabo***

Cette étude a été commanditée par l'exploitant industriel et minier Koniambo Nickel SAS et visait à étudier l'évolution temporelle des populations de pétrel de Tahiti sur le massif de Koniambo. Un état des populations a été établit entre 2004 et 2007, puis une caractérisation des populations *post* et *per* exploitation a été mené en 2017 -2018. L'étude des populations s'est faite grâce à des opérations d'écoute de l'activité vocale des oiseaux sur le terrain.

Les résultats de cette étude montrent une diminution statistiquement significative et importante de l'activité vocale des oiseaux (diminution d'un facteur 6) qui peut être interprétée comme une probable diminution de l'abondance de ces derniers. Alors que le site avait permis l'identification de 38 sites de nidification (33 probables et 3 certains) en 2004-2007, aucun site de nidification n'a pu être identifié en 2017-2018. Les résultats suggèrent que ces diminutions peuvent être attribuées soit à la destruction directe des terriers (nids) par les activités minières, soit à une détérioration des conditions de nidification liées aux éclairages, au bruit et à la poussière.

A noter que nous avons également identifié une étude plus générale menée en 2007 par l'IAC sur l'état des populations d'oiseaux menacées sur le massif du Koniambo (DELELIS *et al.,* 2007) mais le rapport n'est pas accessible.

Sources :

PAGENAUD A., BOURGEOIS K., DROMZÉE S., THIBAULT M., CHAGNEAU G., BARRÉ N., BOUYÉ E., CHARTENDRAULT V., DELELIS N., DIJOUX J., PATROIS M., SPAGGIARI J., VIDAL E. (2021). Tahiti Petrel *Pseudobulweria rostrata* population decline at a nickel-mining site: a critical need for adapted conservation strategies.

DELELIS N., CHARTENDRAULT V., BARRÉ N. (2007). Oiseaux menacés du massif de Koniambo. État des populations, recommandations d'atténuation et de compensations. Rapport final IAC & SCO pour KNS, non publié, 109 p.

- ***Étude de la Société Calédonienne d'Ornithologie – SCO : impact des pollutions lumineuses sur les procellariidés de Nouvelle-Calédonie***

L'étude menée en 2009 par la SCO a été réalisée dans le cadre d'un stage de Master 2 et visait à mieux caractériser et comprendre les impacts de la pollution lumineuse sur trois espèces de procellariidés sensibles de Nouvelle-Calédonie : le puffin fouquet, le pétrel de Tahiti et le pétrel de Gould. L'étude s'est appuyée sur l'exploitation des données relatives aux échouages des 3 espèces collectées dans le cadre de l'initiative « SOS PETRELS » lancée en 2007 par l'association, et sur les données d'éclairages fournies par EEC pour la commune de Nouméa.

Les résultats de l'étude montrent que sur les trois premières années de lancement de l'initiative « SOS PETRELS » (2007-2009), le rapportage de 513 oiseaux échoués avaient été effectués. 80,5 % des échouages concernaient le puffin fouquet, 14% les pétrels de Gould et 5,5% les pétrels de Tahiti. L'âge des individus échoués concerne en moyenne 50% d'adultes et 50% de juvénile, toutes espèces confondues. Un pic d'échouage des juvéniles de puffins fouquet est constaté à la mi-mai, période d'envol des jeunes qui représentent alors 93% des animaux observés.

Concernant les pétrels de Gould, les pics enregistrés témoignent aussi de la période sensible d'envolée des jeunes qui a lieu entre mars et mai.

Pour les pétrels de Tahiti, les échouages ont été constatés toute l'année durant, sans pic particulier ce qui corrobore l'absence d'une saison de reproduction définie pour cette espèce en Nouvelle-Calédonie.

Cette étude s'est également intéressée à l'effet potentiel du cycle lunaire et de la densité d'éclairage sur les échouages mais aucune corrélation significative n'a été identifiée. En revanche, un effet significatif du type d'éclairage et de l'intensité lumineuse a été mesurée sur les sites d'échouage comparés à des sites témoins. Ainsi, les zones d'échouages se sont révélées être des zones particulièrement éclairées et dont l'éclairage est souvent composé d'enseignes lumineuses et de projecteurs. Les éclairages encastrés dans le sol et les lampadaires type « boule » sont également des types d'éclairages généralement présents sur les sites d'échouages.
La répartition spatiale des échouages sur la commune de Nouméa montre que les échouages ont essentiellement lieu à proximité immédiate du littoral avec quelques zones d'échouage plus denses. Le dépôt pétrolier de Numbo représentait une zone particulièrement problématique puisqu'il regroupait plus de 22% des échouages de Nouméa.

Sources :

MARESCHAL J. (2009). Impact des pollutions lumineuses sur les procellariidés de Nouvelle-Calédonie.

- ***<u>Le suivi réglementaire des échouages d'oiseaux marins sur le site industriel et minier de Prony Ressources Nouvelle-Calédonie (PRNC)</u>***

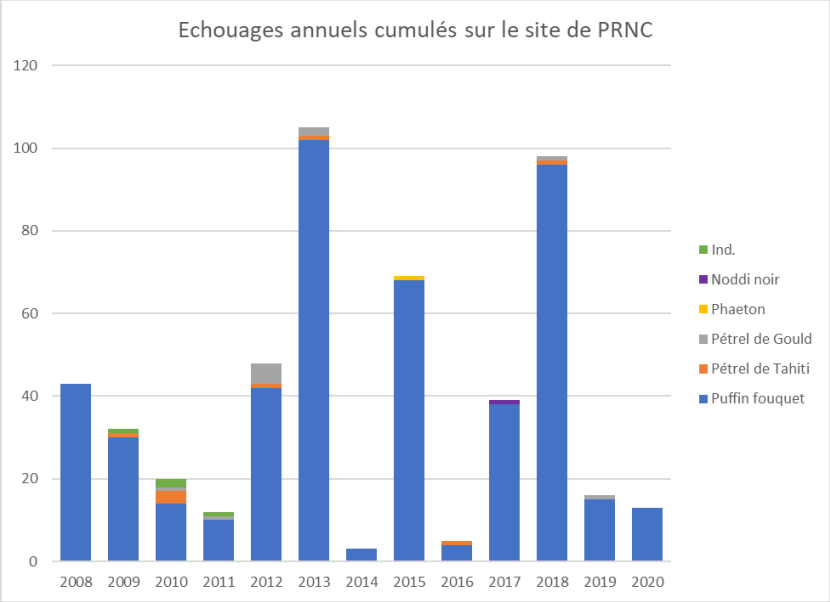
Prony Ressources Nouvelle-Calédonie, précédemment Vale Nouvelle-Calédonie, réalise depuis 2008 un suivi des échouages des oiseaux marins au niveau de ses installations portuaires, industrielles et minières. Ce suivi se fait en partenariat avec la SCO dans le cadre de son initiative « SOS PETRELS ».

Dans le cadre de ce programme, une sensibilisation du personnel est effectuée pour qu'un signalement de tout animal égaré soit effectué auprès des équipes du service environnement de l'exploitant. Les animaux sont alors pris en charge par l'équipe qui les sécurisent et les soignent avant de les relâcher sur le littoral. Tout animal grièvement blessé est confié au Parc Zoologique Forestier de la province Sud. Les informations relatives aux échouages qui sont intervenus sont archivées par l'équipe environnement de l'exploitant et son transmissent à la SCO.

Le rapportage effectué par PRNC dans le cadre de ce suivi donne les chiffres annuels concernant les espèces retrouvées échouées, le pourcentage de survie des individus et les zones d'échouages sur le complexe portuaires, industriel et minier.

Ci-après, nous donnons les principaux résultats relatifs aux données collectées par PRNC et permettant de décrire le phénomène des échouages d'oiseaux marins sur leur secteur.

Au total, 503 oiseaux marins échoués ont été comptabilisés sur la période 2008-2020. Les échouages concernent 5 taxons, 95% des individus étant des puffins fouquet, 2,2% des pétrels de Gould, 1,6% des pétrels de Tahiti, et moins de 1% respectivement pour le noddi noir, une espèce indéterminée de phaéton et des individus d'espèce indéterminée[1].



[1] Il ne s'agit pas, *a priori,* de taxons non-décrits mais simplement de défauts d'identification des espèces observées.

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Puffin fouquet	43	30	14	10	42	102	3	68	4	38	96	15	13
Pétrel de Tahiti	0	1	3	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0
Pétrel de Gould	0	0	1	1	5	2	0	0	0	0	1	1	0
Phaeton	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Noddi noir	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Ind.	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	**43**	**32**	**20**	**12**	**48**	**105**	**3**	**69**	**5**	**39**	**98**	**16**	**13**

Figure 7: graphique et tableau présentant le cumul annuel des échouages enregistrés sur le site de PRNC par taxon sur la période 2008-2020 (source : PRNC)

La figure ci-dessus indique une forte variabilité des cumuls annuels d'échouages observés sur le site de PRNC et qui peut aller de 105 individus en 2013 à 3 individus l'année suivante en 2014. Sur ce site, la moyenne annuelle des échouages est 38,7 ± 33,7.

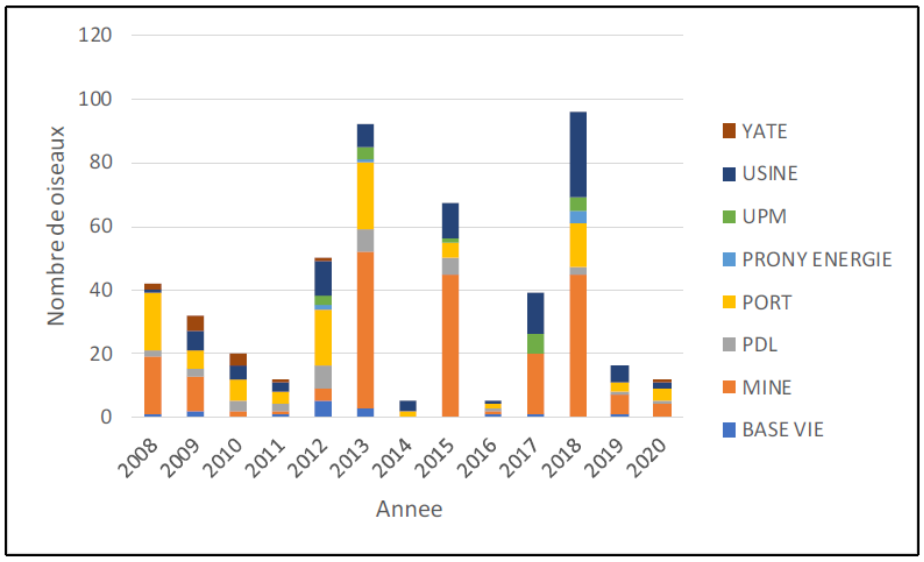
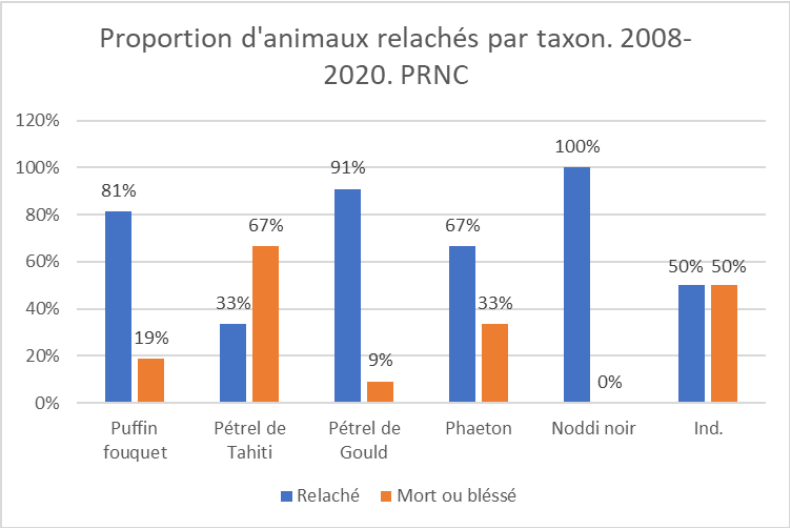


Figure 8: graphique présentant le cumul annuel des échouages sur le site de PRNC en fonction des zones considérées pour la période 2008-2020 (Source : Vale NC 2021)

La répartition spatiale des échouages sur le site indique que la zone cumulant le plus grand nombre d'échouage est la zone d'extraction minière « Mine », suivie de la zone portuaire « Port » et industrielle « Usine » (voir figure 8). A noter que nous distinguons une légère différence pour les chiffres présentés dans la figure 7 et 8 pour l'année 2013 (différence de 15) qui pourrait être liée au fait que le lieu des échouages n'a pas été déterminé pour certains individus.

Concernant la saison des échouages, les rapports évoquent un pic à la deuxième quinzaine de mai (saison d'envol des jeunes puffins fouquet) avec une majorité des échouages durant la période avril – juin. Les conditions météorologiques sont identifiées comme une variable très importante sur les échouages à la saison des envols des jeunes puffins. Des conditions nuageuses ou de pluies accentueraient grandement le nombre d'animaux échoués et dans la situation inverse, des conditions météo clémentes et un ciel dégagé aurait tendance à limiter le phénomène.



	Nbre relaché	% Relaché	Nbre mort ou blésé	% Mort ou blésé
Puffin fouquet	381	81%	88	19%
Pétrel de Tahiti	3	33%	6	67%
Pétrel de Gould	10	91%	1	9%
Phaeton	2	67%	1	33%
Noddi noir	1	100%	0	0%
Ind.	1	50%	1	50%

Figure 9: Graphique et tableau rapportant les informations relatives à la proportion d'animaux relâchés sur la période 2008-2020 (source : PRNC / Vale NC)

Au total, 80% des oiseaux échoués ont pu être relâchés dans le milieu naturel après s'être vu dispensés les soins appropriés.

Sources :

- VALE NC (2010). Bilan de l'impact de la pollution lumineuse sur le site de VALE Nouvelle-Calédonie 2007-2010.
- VALE NC (2012). Bilan des impacts dus aux pollutions lumineuses sur le site de VALE Nouvelle-Calédonie 2011-2012.
- VALE NC (2016). Bilan Faune Terrestre 2015. Une synthèse des actions, des études et des suivis menés sur la faune terrestre en 2015.
- VALE NC (2018). Bilan Faune Terrestre 2017. Une synthèse des actions, des études et des suivis menés sur la faune terrestre en 2017.
- VALE NC (2019). Bilan Faune Terrestre 2018. Une synthèse des actions, des études et des suivis menés sur la faune terrestre en 2018.
- VALE NC (2021). Rapport annuel 2020 concernant l'activité minière Incidence des activités minières sur l'occupation des sols, l'environnement et les eaux superficielles et souterraines.

- ***Initiative « SOS PETRELS » de la Société Calédonienne d'Ornithologie – SCO***

L'initiative « SOS PETRELS» a été initiée par la Société Calédonienne d'Ornithologie – SCO en 2007. Dans ce cadre, elle sensibilise la population calédonienne à la nécessité de prendre en considération l'impact de la pollution lumineuse sur les oiseaux marins et en particulier les procellariidés, particulièrement sensibles. La SCO communique sur la conduite à tenir si un oiseau échoué est observé en donnant des indications sur les modalités de sécurisation et de sauvetage de l'animal. Si l'animal n'est pas pris en charge directement par la SCO, une prise de contact reste recommandée pour que l'évènement puisse être recensé. A cet effet, un formulaire peut également être renseigné en ligne. Depuis 2007, la SCO archive les informations relatives aux échouages des oiseaux marins. Ci-après, nous donnons les principaux résultats relatifs aux données collectées et mise à disposition par l'association.

Les données de la SCO, desquelles ont été extraites celles de Prony ressources Nouvelle-Calédonie, regroupent un total de 1336 échouages d'oiseaux marins en Nouvelle-Calédonie sur la période 2004-2022[2] avec un suivi régulier à compter de janvier 2007 (date de lancement de « SOS PETRELS »). Ces données ne contiennent pas de double-comptages provenant des informations du suivi de Prony ressources Nouvelle-Calédonie. Les informations collectées correspondent à la date de l'échouage, l'espèce concernée, l'adresse et la position GPS dans certain cas, ainsi qu'une observation sur la cause probable de l'échouage.

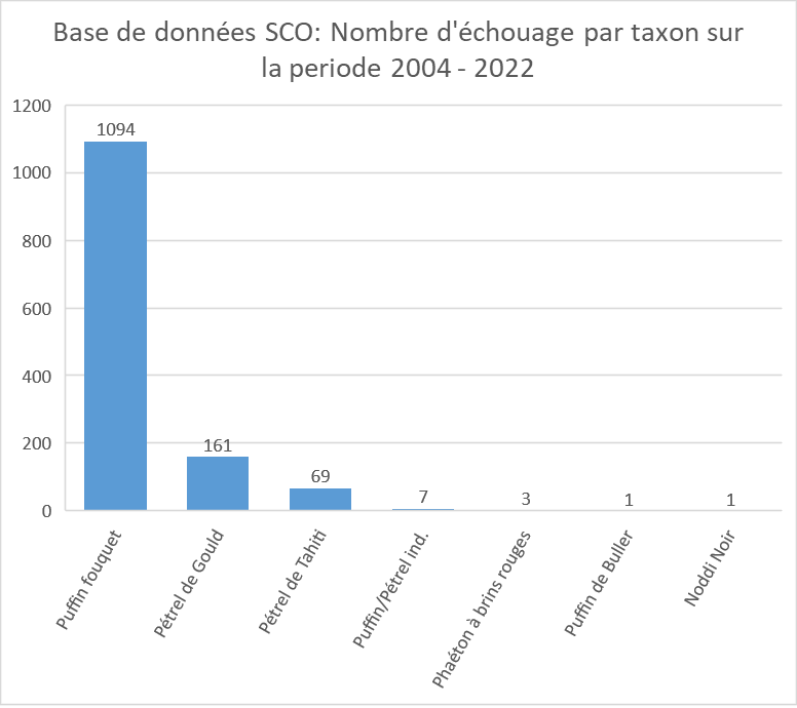


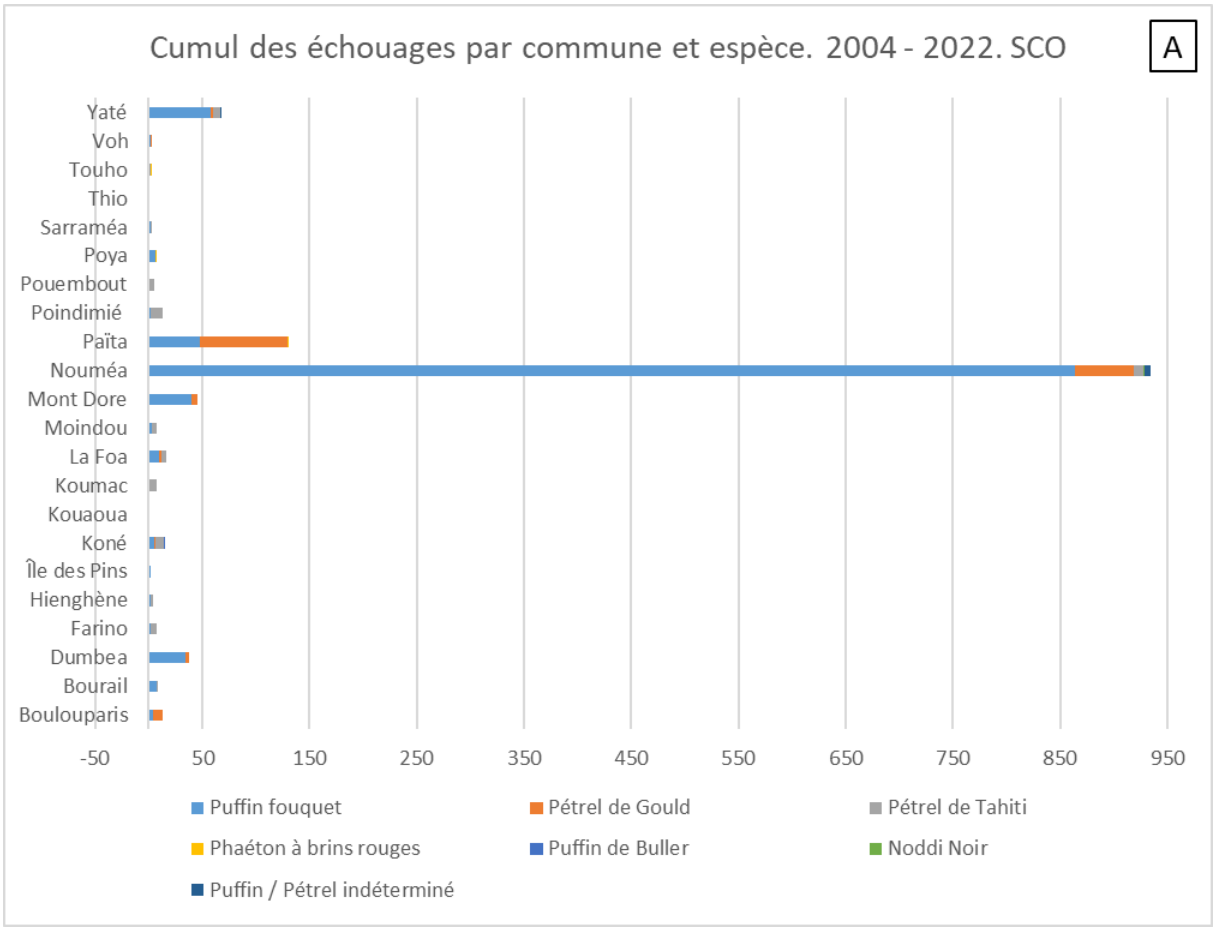
Figure 10: Graphique présentant le nombre d'échouage par taxon d'oiseau marin enregistrés dans le cadre de l'initiative « SOS PETRELS » de la SCO sur la période 2004-2022 (Source : SCO)

Au total, 6 taxons sont répertoriés dans les échouages avec 81,9% de puffins fouquet, 12,1% de pétrels de Gould, 5,2% de pétrels de Tahiti et respectivement moins de 0,4% de phaétons à brins rouges, puffin de Buller, et Noddi noir. Sept individus (0,5%) n'ont pas fait l'objet d'une identification précise et sont

[2] Les données de la SCO pour l'année 2022 concerne la période allant de janvier à novembre 2022.

désignés « puffin/pétrel ind. ». Selon la SCO, les échouages des trois phaétons à brins rouges et de l'individu de noddi noir ne sont probablement pas imputables à la pollution lumineuse mais plutôt à de mauvaises conditions météorologiques.

Remarque : en fin d'année 2021, le signalement d'un échouage de pétrel à ailes noires sur la commune de Hienghène a été recueilli par la SCO (information non présente dans les extractions de base de données SCO).



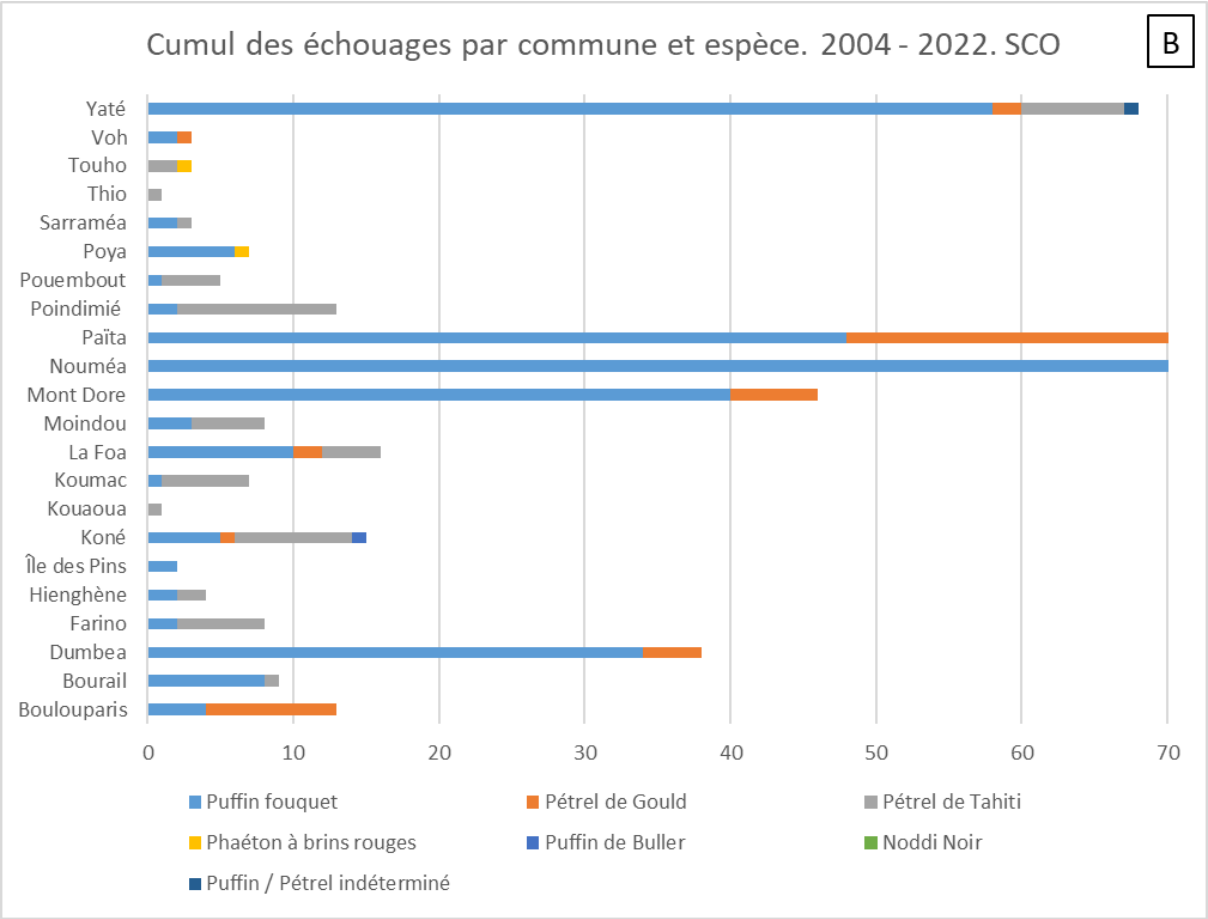


Figure 11: graphiques présentants le cumul des échouages par taxon et par commune répertoriés dans le cadre de « SOS PETRELS » sur la période 2004-2022. Les graphiques A et B représentent les mêmes informations, toutefois, la graduation maximale du graphique B a été limitée à 70 pour faciliter la lecture des résultats (sources : SCO).

Les échouages concernent près des deux tiers des communes du territoire avec 22 communes reparties entre la province Nord et Sud. Le maximum des échouages est enregistré sur la commune de Nouméa avec 935 échouages comptabilisés et le minimum sur les communes de Kouaoua et Thio avec 1 échouage. En regardant, la composition taxonomique des animaux échoués, on remarque que cette composition est variable selon les communes.

Sur les 22 communes répertoriant des échouages, 10 sont majoritairement concernées par des échouages de puffins fouquet, 9 par les pétrels de Tahiti et 2 par les pétrels de Gould.

Dans les commentaires liés aux observations, les éclairages mis en cause sont souvent les lampadaires de type « boule », les « projecteurs » sur des infrastructures de type hangar et l'éclairage du réseau routier. Sur la commune de Yaté, les échouages enregistrés sont essentiellement dus aux éclairages de l'activité industrielle et minière du complexe de Prony resources NC.

- ***Archivage des données d'échouage du Parc Zoologique Forestier – PZF de la province Sud***

Le Parc Zoologique Forestier de la province Sud est partenaire de la SCO dans le cadre de l'initiative « SOS PETRELS ». A ce titre, le PZF prend en charge les animaux échoués qui leurs sont confiés pour être soignés dans leur infirmerie. Les informations relatives aux oiseaux sont archivées

par le PZF selon le format défini par la SCO qui inclut notamment l'espèce concernée, la date de récupération de l'animal, le lieu de découverte de l'animal, l'observation sur la cause probable de l'échouage, des informations sur l'état de santé et l'âge, le devenir de l'individu après les soins (relâché ou mort) et l'éventuelle collaboration avec la SCO permettant d'éliminer les double-comptages.

En supprimant les éventuels doublons avec les informations de PRNC et de la SCO, les données du PZF comptabilisent 514 informations relatives à 18 taxons d'oiseaux marins échoués pris en charge sur la période 2010-2021. Parmi ces 18 taxons, la détresse de certains oiseaux n'est probablement pas liée à la pollution lumineuse car il s'agit d'espèces *a priori* peu sensibles à cette perturbation ou alors les explications relatives aux causes de l'échouage permettent d'écarter cette hypothèse (balbuzard, mouette, fou masqué, sterne huppée, sterne fuligineuse). En retirant ces individus, on obtient un total de 488 d'échouages et 9 taxons concernés

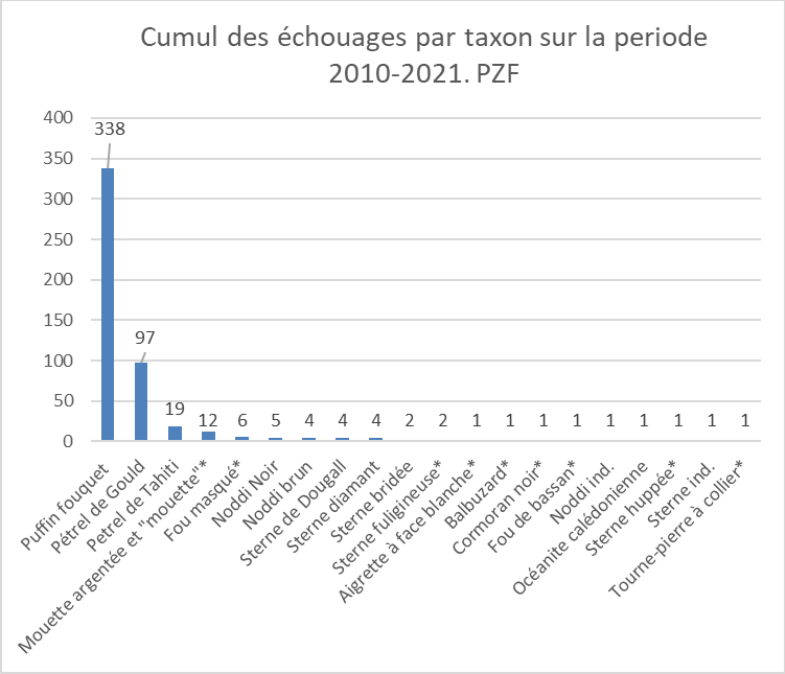


Figure 12: Graphique représentant le cumul des échouages d'oiseaux marins par taxon sur la période 2010 – 2021. Les taxons notés d'un astérisque ne sont probablement pas concernés par la pollution lumineuse (*). (Source : PZF)

Finalement, les taxons les plus concernés par la problématique de la pollution lumineuse sont les puffins fouquet avec 338 échouages, le pétrel de Gould, 97 échouages et le pétrel de Tahiti avec 19 échouages recensés. Ces trois espèces représentent 93% des échouages liés à la pollution lumineuse.

Lorsque l'on regarde les 508 commentaires relatifs aux succès de réintroduction des animaux, on constate que 392 (77%) suggèrent que le relâché s'est effectué normalement et dans les autres cas, les animaux ont succombé de leurs blessures ou bien ont dû être euthanasiés en raison d'un état de santé trop dégradé.

Figure 13: Affiche de sensibilisation dans le cadre de l'initiative « SOS PETRELS ». (source : SCO)

- ***<u>Compilation des informations sur les échouages d'oiseaux marins</u>***

Afin d'offrir la vision la plus exhaustive possible concernant les échouages d'oiseaux marins en Nouvelle-Calédonie, les informations collectées par la Société Calédonienne d'Ornithologie - SCO, le Parc Zoologique Forestier de la province Sud – PZF et l'exploitant Prony Resources Nouvelle-Calédonie – PRNC (anciennement Vale NC) ont été compilées en prenant le soin de supprimer les double-comptages et les cas d'échouages qui ne sont *a priori* pas causés par la pollution lumineuse selon les informations disponibles dans les commentaires relatifs à chaque échouage.

	SCO données 2004-2022	PZF données 2010 - 2021	PRNC / Vale NC Données 2008-2020	Total	Proportion %
Puffin fouquet	1094	338	478	1910	82,2%
Pétrel de Gould	161	97	11	269	11,6%
Petrel de Tahiti	69	19	8	96	4,1%
Noddi noir	1	5	1	7	0,3%
Noddi brun	0	4	0	4	0,2%
Phaéton à brins rouges et autre phaéton	3	0	1	4	0,2%
Puffin de Buller	1	0	0	1	0,04%
Puffin / Pétrel ind.	7	8	0	15	0,6%
Sterne de Dougall	0	4	0	4	0,2%
Sterne diamant	0	4	0	4	0,2%
Sterne bridée	0	2	0	2	0,1%
Noddi ind.	0	1	0	1	0,04%
Océanite calédonienne	0	1	0	1	0,04%
Sterne ind.	0	1	0	1	0,04%
Ind.	0	1	4	5	0,2%
			TOTAL	**2324**	

Figure 14: Tableau de synthèse relatif aux informations sur les échouages d'oiseaux marins collectées par la SCO, le PZF et PRNC/Vale NC sur la période 2004-2022 (Source : SCO, PZF, PRNC/Vale NC).

Les informations disponibles permettent de comptabiliser 2324 échouages d'oiseaux marins sur la période 2004-2022 (2320 sur la période 2007-2022). Les oiseaux marins retrouvés concernent 11 taxons avec 97,9% des échouages qui concernent uniquement 3 espèces : le puffin fouquet avec 82,2% des échouages (1910 individus), le pétrel de Gould, 11,6% (269 individus) et le pétrel de Tahiti avec 4,1% des échouages (96 individus). Le reste des occurrences représentent seulement 0,3 à 0,04% des individus échoués en mettant de côté les taxons indéterminés. Selon la SCO, les échouages des phaétons à brins rouges et des noddis noirs ne sont probablement pas imputables à la pollution lumineuse mais a de mauvaises conditions météorologiques.

Remarque : en fin d'année 2021, le signalement d'un échouage de pétrel à ailes noires sur la commune de Hienghène a été recueilli par la SCO (information non présente dans les extractions de base de données). Cette information porte donc le nombre de taxons victimes d'échouages à 12.

Considérant la part importante des échouages représentée par le puffin fouquet, le pétrel de Gould et le pétrel de Tahiti, les analyses suivantes n'ont été menées que pour ces trois espèces. La période d'analyse a également été réduite à 2007 – 2022 dans la mesure où seules des informations marginales avaient été collectées sur la phase antérieure au lancement de « SOS PETRELS » (4 enregistrements).

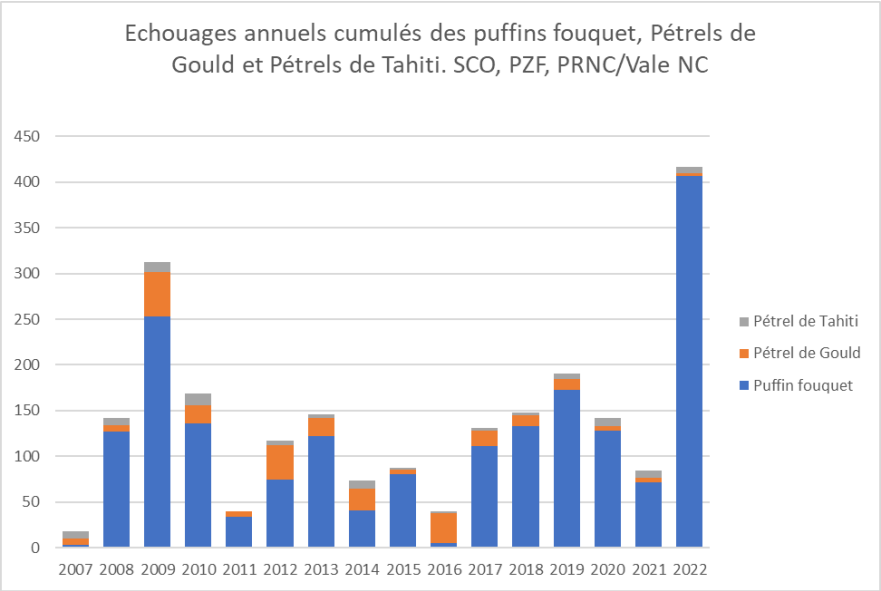


Figure 15: Graphique présentant les échouages annuels cumulés pour les trois principales espèces concernées : puffin fouquet, pétrel de Gould et pétrel de Tahiti, période 2007-2022. (sources : SCO, PZF, PRNC/Vale NC)

Pour les trois espèces les plus concernées par les échouages, la figure ci-dessus fait apparaitre une importante variabilité annuelle dans le nombre d'échouages recensés qui peut aller de 416 échouages en 2022 à 18 échouages en 2007. Le nombre moyen d'échouages annuel est de 141 ET ± 101,6.

On constate sur la figure que les échouages de puffins fouquet dominent les observations mais il y a tout de même une année, en 2016, où les échouages de pétrel de Gould ont dépassé ceux des puffins fouquet avec 33 individus échoués contre 5.

A noter que les données collectées par la SCO couvrent la période 2007-2022 tandis que celles de PRNC/Vale NC concernent 2008-2020 et 2010-2021 pour le PZF. La figure ci-après présente la répartition des données d'échouages annuels cumulés pour les trois espèces et selon le producteur.

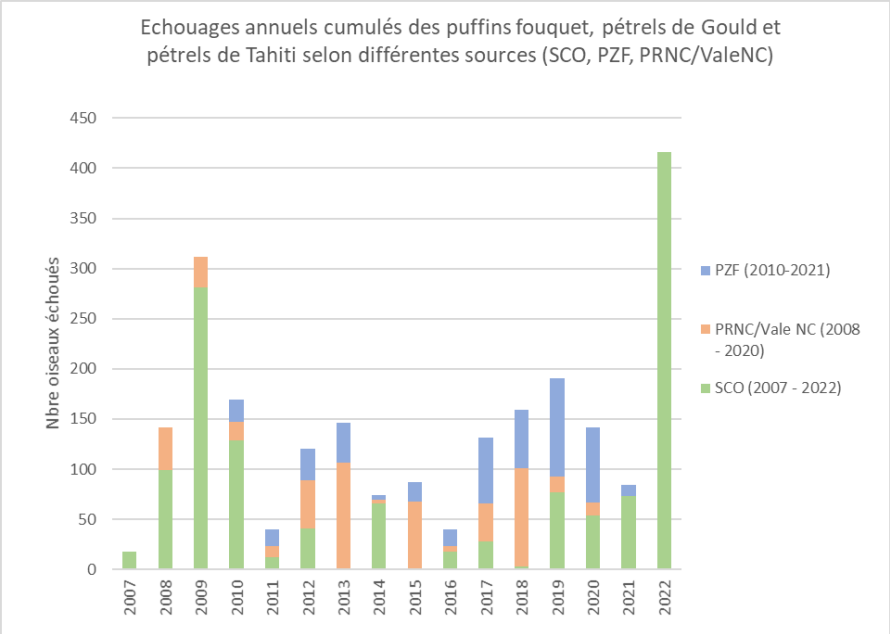
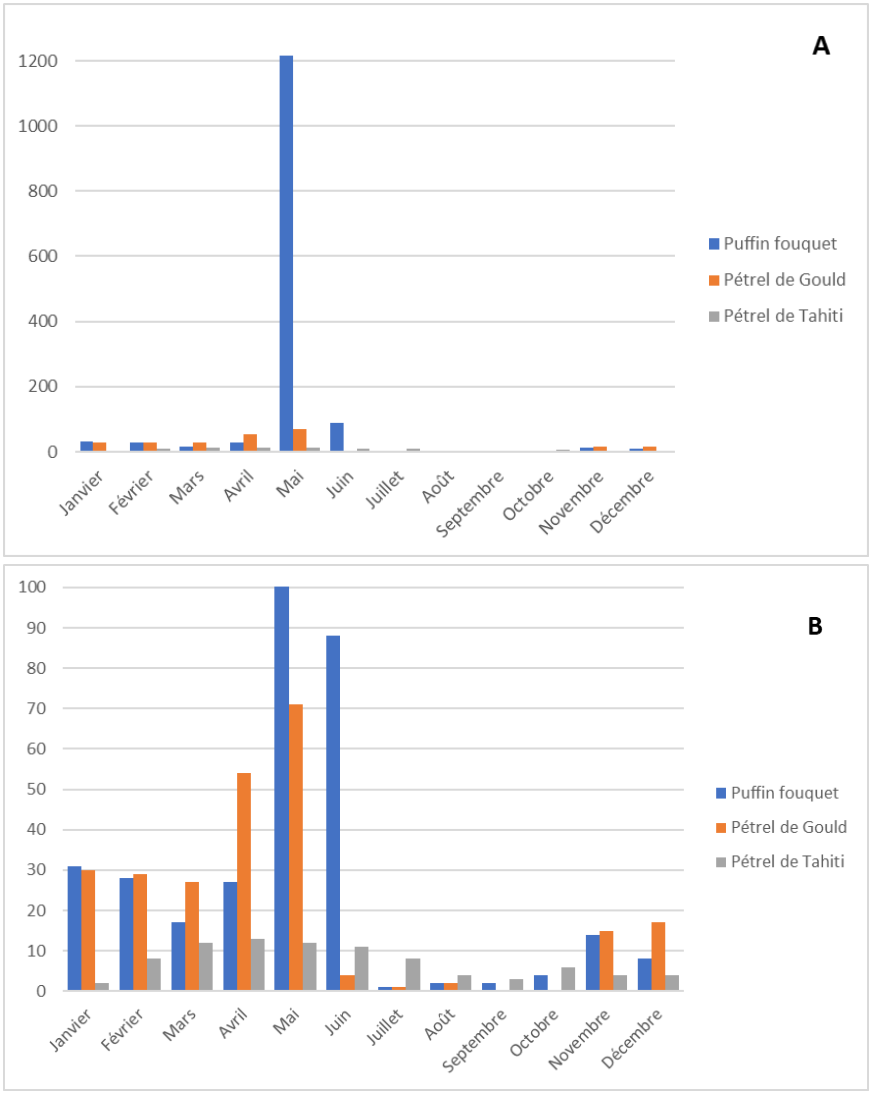


Figure 16 : Graphique présentant les cumuls annuels des échouages pour trois espèces d'oiseaux : puffin fouquet, pétrel de Gould, pétrel de Tahiti et selon la source de données. Période des données 2007-2022. (Sources : SCO, PZF, PRNC/Vale NC)



	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Puffin fouquet	31	28	17	27	1215	88	1	2	2	4	14	8
Pétrel de Gould	30	29	27	54	71	4	1	2	0	0	15	17
Pétrel de Tahiti	2	8	12	13	12	11	8	4	3	6	4	4

Figure 17: Graphiques et tableau présentant les cumuls mensuels des échouages pour trois espèces d'oiseaux : puffin fouquet, pétrel de Gould, pétrel de Tahiti. Période des données 2007-2022. Sur le graphique B, l'échelle des ordonnées débute à la valeur 100 pour faciliter la lecture. (Sources : SCO, PZF, PRNC/Vale NC)

La figure ci-dessus permet d'analyser la saisonnalité des échouages pour les trois espèces les plus concernées. Ces résultats ont été produits à partir des informations provenant de la SCO et du PZF dans la mesure où les informations disponibles pour PRNC/Vale NC ne permettaient bien souvent pas d'identifier la date précise de l'observation. Ils confirment une saisonnalité des échouages pour les puffins fouquet et les pétrels de Gould avec un pic d'échouage au mois de mai, respectivement 1215 individus et 71 individus échoués. Le pétrel de Tahiti quant à lui, voit ses occurrences d'échouage réparties tout au long de l'année avec des cumuls mensuels allant de 2 à 13 individus échoués.

Les échouages de puffins fouquet sont principalement observés de janvier à juin (97,8% des échouages). Le mois de mai constitue le pic des échouages et représente près de 84,6% des occurrences pour cette espèce. Les mois avec les plus faibles occurrences d'échouages pour cette espèce vont de juillet à octobre avec des cumuls mensuels allant de 1 à 4. Les observations cumulées de ces quatre mois ne représentent que 0,6% du total des échouages.

Pour le pétrel de Gould, les échouages sont plus étalés sur la période novembre à mai (97,2% des échouages), avec également un pic au mois de mai qui représente 28,4% des échouages. Le mois d'avril voit également une forte proportion des échouages de cette espèce, avec 21,6% des échouages. Les mois de juin à octobre en revanche ne représentent que 2,8% des échouages annuels.

Pour le pétrel de Tahiti, les faibles effectifs d'observations limitent la portée de l'analyse mais on note que la période de février à juillet rassemble 73,3% des échouages avec le quart restant dispersés entre les mois d'août à janvier. Contrairement aux deux autres espèces, il n'y a pas de pic observé dans les échouages du pétrel de Tahiti.

4.1.2. Tortues marines

Les impacts de la pollution lumineuse sur les tortues marines, en particulier durant leur nidification sur le littoral, sont connus en Nouvelle-Calédonie mais le phénomène ne semble pas avoir été décrit avec précision. Les recherches bibliographiques menées ont permis d'identifier deux documents qui abordent le sujet :

- Un travail de synthèse « Les tortues marines et la pollution lumineuse sur le territoire français » mené en 2011 par le MNHN ;
- Un article scientifique « A New Method to Assess the Light Pollution on Loggerhead Hatchlings from La Roche Percée Rookery, New Caledonia », publié en 2021.

- ***Synthèse du MNHN sur les tortues marines et la pollution lumineuse***

Cette synthèse réalisée en 2011 visait à : 1) établir un bilan des connaissances concernant l'impact de la pollution lumineuse sur les tortues marines sur le territoire français (DOM – TOM inclus) et 2) référencer les actions de gestion en lien avec le sujet.

Concernant la Nouvelle-Calédonie, aucune information n'a pu être collectée sur le sujet : « nous ne disposons pas d'information sur la situation en Nouvelle Calédonie ».

Source :

CLARO F., BARDONNET C. (2011). Les tortues marines et la pollution lumineuse sur le territoire français.

- ***Article relatif au développement d'une méthode d'évaluation de l'impact de la pollution lumineuse sur les Tortues Grosses Têtes***

Cette étude avait pour objet d'étudier l'influence des lumières artificielles sur l'émergence de jeunes tortues Grosses Têtes (*Caretta caretta*) grâce à l'utilisation d'une nouvelle méthode. Au total, 82

émergences ont été suivies sur le principal site de ponte de l'espèce en Nouvelle-Calédonie, la plage de la Roche Percée à Bourail. Les observations ont été réalisées du 02/02/2017 au 05/03/2017.

Les résultats de l'étude montrent que 7% des éclosions étaient perturbées par la pollution lumineuse, toutefois, les traces de dispersion des jeunes tortues sont comparables à celles observées sur un site de référence en Australie, « Mon Repos Beach ». L'étude conclue que le site de ponte de la Roche percée peut être considéré comme non-perturbé par la pollution lumineuse.

Cependant, il est rappelé que des perturbations ponctuelles interviennent avec la luminosité des phares de voiture qui peuvent être orientés vers la plage. Ce phénomène étant ponctuel, il reste difficile à mesurer.

Source :

MAGNAN M. E., READ T. C., FARMAN R. (2021).A New Method to Assess the Light Pollution on Loggerhead Hatchlings from La Roche Percée Rookery, New Caledonia.

4.1.3. Chiroptères

Très peu d'informations permettant de caractériser clairement l'impact de la pollution lumineuse sur les chiroptères de Nouvelle-Calédonie ont pu être identifiées. Seul le rapportage de la modification du comportement alimentaire de microchiroptères qui viennent s'alimenter en insectes prés de sources lumineuses a été identifié dans le rapportage des suivis de la chiroptérofaune opérés par la SLN. Il s'agit là d'un comportement relativement connu à travers le monde pour certaines espèces de chauve-souris. Des travaux menés en 2007 pour l'inventaire de la mégachiroptérofaune du massif du Koniambo ont été menés par l'IAC mais le document reste confidentiel. Enfin, un rapport de synthèse bibliographique produit par l'IAC en 2016 fait également le point sur les connaissances relatives aux 5 espèces de chauve-souris insectivores de la Nouvelle-Calédonie et rapporte la sensibilité d'une d'entre elle à la pollution lumineuse.

A noter que dans le cadre d'une convention IAC – KNS, des travaux visant à évaluer l'impact des sources lumineuses sur les chauves-souris insectivores devrait prochainement débuter dans la zone du massif du Koniambo.

- ***Inventaire de la mégachiroptérofaune du Massif du Koniambo et recommandations de mesures de protection***

Ces travaux correspondent à un inventaire de la mégachiroptérofaune qui a été commandité par la société KNS et réalisé par l'IAC en 2007. Le document qualifié de confidentiel par le commanditaire n'a pas pu être consulté dans le cadre de l'étude. Des informations sensibles sur la localisation des nids de roussettes y seraient rapportées. Selon l'auteur, cette étude a également permis d'émettre des

recommandations en matière de gestion des éclairages afin de limiter les perturbations de la mégachiroptérofaune.

Source :

BRESCIA F. (2007). Inventaire de la mégachiroptérofaune du Massif du Koniambo et recommandations de mesures de protection. Rapport d'étude IAC/ Programme Elevage et Faune Sauvage n°6/2007. Convention de collaboration IAC/KNS n°3190000-00000-CN-C208-001. 37p

- ***Suivi des populations de chiroptères sur les sites miniers de la SLN à Thio***

Le suivi des chiroptères opéré à Thio par la SLN correspond à la mise en œuvre d'une prescription réglementaire pour étudier les éventuels impacts de l'activité minière sur ce compartiment de la biodiversité. Ce suivi a débuté en 2016 sur les zones de Thio plateau et de Dothio.

Dans le rapportage effectué en novembre 2019, le bureau d'études en charge du suivi rapporte « quelques individus de *Miniopterus australis* et *Miniopterus macrocneme* (M.spp) » qui viennent s'alimenter autour des lumières utilisées pour l'exploitation du site de « Thio Plateau » la nuit. Au niveau du village de Thio en contrebas de la mine, « des contacts abondants de *Miniopterus australis* » ont également été relevés autour des lumières du village.

L'auteur explique que la fréquentation des éclairages est liée à l'attraction des insectes qui sont ensuite prédatés par les chauves-souris. Il rapporte également les effets indirects de cette modification du comportement alimentaire : « ce phénomène d'attraction des chiroptères modifie leur comportement de chasse et les éloigne de leur niche écologique originelle, modifiant leur rôle écologique clé de voute, de régulateur des populations d'insectes, les insectes prédatés autour des lampadaires n'étant pas les mêmes que ceux chasser par les chiroptères dans le milieu naturel ».

Source :

DEBAR L., RAHMOUN S. (2019). Suivi des populations de chiroptères du site minier SLN de Thio Plateau 2e session de suivi : S2.

- ***Synthèse des connaissances sur les chauves-souris insectivores de la Nouvelle-Calédonie – Institut Agronomique Calédonien - IAC***

Ce travail de synthèse avait pour objectif de faire un état des lieux sur les connaissances biologiques relatives aux 5 espèces de chauve-souris insectivores de Nouvelle-Calédonie étant donné le peu d'informations disponibles localement sur ces animaux.

Seul fait intéressant dans le cadre de notre étude, le travail de l'IAC rapport que, pour l'espèce *Chalinolobus tuberculatus* présente en Nouvelle-Calédonie, le « rythme d'activité de cette espèce est de manière générale […] négativement corrélée à l'urbanisation et à la lumière artificielle ».

Source :

MILLION L., BRESCIA F. (2016). Les chauves-souris insectivores de la Nouvelle-Calédonie. État de l'art et comparaison avec les espèces du Pacifique.

4.2. Dans le monde

La littérature scientifique concernant les effets de la lumière artificielle sur les êtres vivants est relativement abondante. Elle concerne un panorama d'organismes étendu, allant du zooplancton aux arbres en passant par les coraux et les mammifères marins. Dans la partie suivante, un aperçu synthétique des effets de la lumière artificielle sur ces différents organismes est donné, notamment au travers de tableaux récapitulatifs. Les effets reportés sont ensuite discutés pour être regroupés en différentes catégories. Enfin, les effets de la pollution lumineuse à différents niveaux d'organisation biologiques sont abordés.

4.2.1. Compartiments de la biodiversité concernés

À la suite des recherches bibliographiques effectuées, les tableaux suivants ont été consolidés pour synthétiser les effets de la lumière artificielle sur différents compartiments de la biodiversité incluant : les amphibiens, les arachnides, les insectes, divers invertébrés, les mammifères, les mollusques, les oiseaux, les poissons, les reptiles et les végétaux.

Groupe	Détail taxonomique	Effet de la lumière artificielle	Référence bibliographique
Amphibiens	Grenouille *Rana clamitans malanota*	- Modification du comportement de vocalisation et de déplacement	BAKER B. J. (2006)
	Grenouilles nocturnes	- Diminution temporaire des capacités visuelles	BUCHANAN B.W. (1993)
	Crapauds et grenouilles - Anoures	- Effet attractif	JAEGER R.G. & HAILMAN J.P. (1973)
	Grenouilles	- Interruption de la reproduction	LONGCORE T. & RICH C. (2004)
Arachnides	Araignée *Eriophora biapicata*	- Accélération de la maturation des juvéniles - Diminution du nombre d'œufs portés par la femelle - Diminution de la taille des individus - Modification du comportement alimentaire	WILLMOTT N. J. *et al.* (2018) HEILING A. (1999).
Insectes	Papillons - Lépidoptères	- Effet d'attraction	BETZ J.-T. (1961) BLAB J. *et al.* (1988) BRUSSEAUX G. (1991) LHONORE J.E. (1987) KOLLIGS D. (2000)
	Lucioles	- Diminution de l'attractivité et des chances de reproduction	LLOYD, J. E. (2002)
	Papillon Sphynx *Deilephila elpenor*	- Modification de la perception des couleurs	KELBER J.S. *et al.* (2006)
	Papillons de nuit - Hétérocères	- Effet d'attraction - Perturbation de la reproduction - Perturbation du développement larvaire - Augmentation de la prédation	BOYES D. H. *et al.* (2020)
Invertébrés divers	Corail *Acropora millepora* *Acropora digitifera*	- Désynchronisation de la reproduction	AYALON I. *et al.* (2020)
	Corail *Acropora eurystoma* *Pocillopora damicornis*	- Augmentation du stress oxydant - Diminution des performances photosynthétiques - Modification de la densité en algues symbiotiques et la concentration en Chlorophylle	AYALON I. *et al.* (2019)
	Corail	- Modifications physiologiques des algues symbiotiques du corail	AYALON I. *et al.* (2021)
	Corail *Acropora eurystoma*	- Modification de l'expression des l'expression des gènes	ROSENBERG Y. *et al.* (2019)
	Vers plats - planaires	- Effet répulsif	TEYSSÈDRE, A. (1996)
	Daphnies	- Modification des migrations verticales	MOORE M.V. *et al.* (2000)
	Zooplancton	- Modification des migrations verticales	PIERCE S.M. & MOORE M.V. (1998)
	Zooplancton	- Augmentation de la prédation	GLIWICZ Z.M. (1986)

Figure 18: Tableau regroupant les effets de la lumière artificielle identifiés dans la littérature scientifique pour les amphibiens, arachnides, Insectes et autres invertébrés.

Groupe	Détail taxonomique	Effet de la lumière artificielle	Référence bibliographique
Mammifères	Chiroptères	- Perturbation de la reproduction - Effet répulsif - Modification du comportement alimentaire - Modification de la compétition interspécifique	HOLSBEEK L. (2008) VOIGT C.C. *et al.* (2018)
	Chiroptères	- Effet négatif sur la croissance des jeunes	BOLDOGH S. *et al.* (2007)
	Mammifères terrestres: rongeurs, lagomorphes, chauve souris, primates, opossum, blaireaux	- Influence sur le comportement avec un effet répulsif	BEIER P. (2006)
	Micro-mammifères et logamorphes	- Modification du comportement alimentaire	BEIER P. (2006) BIRD B.L. *et al.* (2004) KOTTLER B.P. (1984)
	Mammifères marins Phoques veaux-marins (Phoca vitulina)	- Modification du comportement alimentaire	YURK H. & TRITES A.W. (2000)
	Hérissons	- Modification du régime alimentaire	OBRTEL B. & HOLISOVA V. (1981)
	Marsupial *Macropus eugenii*	- Diminution de la production de Mélatonine	ROBERT K. A. *et al.* (2015)
	Hamster *Phodopus sungorus*	- Augmentation de la taille des gonades - Augmentation de l'expression des gênes correspondant à la production d'hormones thyroïdiennes - Augmentation de l'expression des gênes correspondant à la production de Mélatonine	IKENO T. *et al.* (2014)
	Lémurien *Microcebus murinus*	- Augmentation de la production d'œstradiol - Œstrus précoce	LE TALLEC T. *et al.* (2015)
	Hamster *Phodopus sungorus*	- Atténuation des fluctuations diurnes de cortisol	BEDROSIAN T. A. *et al.* (2013)
Mollusques	Mollusque marin *Aplysia californica*	- Augmentation de la production d'œufs	WAYNE N. L. & BLOCK G. D. (1992)
	Escargot "petit-gris" *Helix aspersa*	- Effet d'attraction	PEREA J. *et al.* (2007)
	Limace *Limax maximus*	- Augmentation de la croissance - Développement précoce des gonades	SOKOLOVE P. G. & MCCRONE E. J. (1978)
	Limace *Limax valentianus*	- Augmentation de la production d'œufs - Ponte précoce - Augmentation de la taille des œufs - Accélération du développement des gonades	SOKOLOVE P. G. & MCCRONE E. J. (1978) UDAKA H. *et al.* (2008) HOMMAY G. *et al.* (2001)
	Escargot d'eau douce *Lymnaea acuminate*	- Augmentation de la croissance - Diminution de la fécondité, du taux de survie et des éclosions	KUMAR N. *et al.* (2016)
	Escargot d'eau douce *Lymnaea stagnalis*	- Maturation sexuelle précoce - Augmentation de la production d'œufs - Accélération de la croissance - Augmentation du stockage de Glycogène - Effet d'attraction	BOHLKEN S. & JOOSSE J. (1981) DOGTEROM G. E. *et al.* (1983) HEMMINGA M. A. *et al.* (1985) TER MAAT A. *et al.* (2007) TER MAAT A. et al. (2012) VAN DUIVENBODEN Y. A. (1982)
	Escargot d'eau douce *Physa integra*	- Effet d'attraction	CLAMPITT P. T. (1974)
	Escargot d'eau douce *Physa pomillia*	- Effet d'attraction	BADMAN D. G. (1966)
	Calamar *Loligo plei* *Lologo sanpaulensis* *Lolliguncula brevis*	- Effet d'attraction	MARTINS R. S. & PEREZ J. A. A. (2006)
	Calamar *Loligo plei*	- Modification du comportement alimentaire	MARTINS R. S. & PEREZ J. A. A. (2006)

Figure 19: Tableau regroupant les effets de la lumière artificielle identifiés dans la littérature scientifique pour les mammifères et les mollusques.

Groupe	Détail taxonomique	Effet de la lumière artificielle	Référence bibliographique
Oiseaux	Oiseaux marins	- Attraction et désorientation	TELFER T. C. *et al.* (1987)
	Pétrels	- Attraction et désorientation	LE CORRE M. *et al.* (2002)
	Barge à queue noire *Limosa limosa*	- Effet répulsif	MOLENAAR de J.G. *et al.* (2000)
	Oiseaux	- Perturbation des déplacements migratoires	TEYSSÈDRE A. (1996)
	Passereau *Parus major*	- Diminution de la production de Mélatonine	DE JONG M. *et al.* (2016)
	Passereau *Turdus merula*	- Diminution de la production de Mélatonine - Modification de la production de Testostérone	DOMINONI D. *et al.* (2013a) DOMINONI D. et al. (2013b) DOMINONI D. et al. (2013c)
	Passereau *Aphelocoma californica*	- Perturbation de la production hormonale : Testostérone, Œstradiol, Mélatonine, LH	SCHOECH S. J. *et al.* (2013)
	Passereau *Parus major*	- Perturbation de la production de Corticostérone	OUYANG J. Q. *et al.* (2015)
Poissons	Saumon *Oncorhynchus spp.*	- Augmentation de la prédation	YURK H. & TRITES A.W. (2000)
	Saumon *Oncorhynchus tshawytscha*	- Effet attractif - Modification du comportement	LARINIER. M. & BOYER-BERNARD S. (1991) NEMETH R. S. et ANDERSON J. J. (1992)
	Poissons abyssaux	- Interruption du comportement naturel - Lésions oculaires potentielles	WIDDER E.A. *et al.* (2005)
	Poissons *Menidia beryllina* *Labidesthes sicculus*	- Modification des relations interspécifiques --> compétition	RAMIREZ R. *et al.* (2006)
	Anguille *Anguilla anguilla*	- Effet répulsif sur les civelles	BARDONNET A. *et al.* (2005)
	Girelle Girella laevifrons	- Modification de la consommation en oxygène et de l'activité - Modification des cycles d'activités normales (circadien et marée)	PULGAR J. *et al.* 2019
	Poisson clown *Amphiprion chrysopterus*	- Diminution de la croissance des juvéniles - Augmentation de la mortalité des jeunes	SCHLIGLER J. *et al.* 2021
	Poisson plat *Solea senegalensis*	- Diminution de la production de Mélatonine	OLIVEIRA C. *et al.* (2007)
	Perche *Perca fluviatilis*	- Diminution de la production de Mélatonine - Suppression des hormones gonadiques	BRÜNING A. *et al.* (2016)
	Saumon *Salmo salar*	- Augmentation de la production de cortisol	MIGAUD H. *et al.* (2007)
	Ombrine *Sciaenops ocellatus*	- Production incontrôlée de Thyroxine	LEINER K. A. & MACKENZIE D. S. (2001)
	Anchois et sardines *Anchoa spp.* *Sardinella brasiliensis* *Harengula clupeola*	- Effet d'attraction	MARTINS R. S. & PEREZ J. A. A. (2006)
	Poissons *Trichiurus lepturus*	- Modification du comportement alimentaire	MARTINS R. S. & PEREZ J. A. A. (2006)

Figure 20: Tableau regroupant les effets de la lumière artificielle identifiés dans la littérature scientifique pour les oiseaux et les poissons.

Groupe	Détail taxonomique	Effet de la lumière artificielle	Référence bibliographique
Reptiles	Tortues marines	- Désorientation des jeunes à l'éclosion	SALMON M. (2003) NICHOLAS M. (2001)
	Tortues marines	- Effet répulsif chez les adultes - Perturbation de l'activité de ponte	SALMON M. (2003) WITHERINGTON B. E. & MARTIN R. E. (2000)
	Gecko *Hemidactylus frenatus*	- Modification du comportement alimentaire	STEPHEN M. *et al.* (2015)
	Gecko *Tarentola mauritanica*	- Modification du comportement alimentaire	MARTIN B. *et al.* (2018)
Végétaux	Arbres *Populus canadensis* *Salix fragilis* *Populus nigra* *Ulmus americana* *Liquidambar styraciflua*	- Rétention du feuillage caduc	MATZKE E. B. (1936) SCHROEDER C. A. (1945) BRIGGS W. R. (2006)
	Arbres	- Bourgeonnement printanier avancé	BENNIE J. *et al.* (2016)
	Arbres *Metrosideros excelsa*	- Augmentation de la floraison	BENNIE J. *et al.* (2016)
	Plante herbacée	- Epaississement des feuilles	GRENIS K. & MURPHY S. M. (2019)
	Plantes ornementales	- Modification de la floraison - Modification de la croissance	CATHEY A. R. & CAMPBELL L. E. (1975a) CATHEY A. R. & CAMPBELL L. E. (1975b)
	Soja *Glycine max*	- Perturbation du développement	BRIGGS W. R. (2006)
	Maïs *Zea mays*	- Augmentation de la croissance - Suppression de la floraison	SINNADURAI S. (1981)
	Plante *Lotus pedunculatus*	- Diminution de la floraison	BENNIE J. *et al.* (2015)
	Trèfles *Trifolium subterraneum* *Trifolium repens* *Trifolium pratense*	- Augmentation des lésions foliaires - Augmentation de la sensibilité à l'ozone	FUTSAETHER C. M. *et al.* (2009)

Figure 21: Tableau regroupant les effets de la lumière artificielle identifiés dans la littérature scientifique pour les reptiles et les végétaux.

Au total, se sont 73 taxons qui ont été répertoriés pour lesquels des effets de la lumière artificielle sont rapportés. Ils appartiennent aux groupes des amphibiens, arachnides, insectes, divers invertébrés, mammifères, mollusques, oiseaux, poissons, reptiles et végétaux. Les niveaux taxonomiques sont très variés et vont de l'espèce jusqu'à des désignations beaucoup plus larges comme les « Oiseaux ». Une grande variété de taxons est concernée, tant pour la faune que pour la flore, avec des caractéristiques biologiques très variées : cycle de vie, régime alimentaire, distribution géographique, habitat…

Les informations rapportées proviennent de 83 documents différents, principalement des articles scientifiques. Il faut garder à l'esprit que les contextes des différentes études ne sont pas forcément comparables. Certaines expérimentations ou observations ont été faites en laboratoire, alors que d'autres ont été réalisées en milieu naturel. De même, l'intensité des sources lumineuses employées ou leur composition spectrale varie. Toutefois, les effets de la lumière artificielle n'en demeurent pas moins démontrés.

La nature des effets de la lumière artificielle sur les organismes est variée et peut être caractérisée dans les catégories suivantes :

- Des effets de répulsion ou attraction ;
- Des perturbations du comportement : alimentation, déplacement, communication, etc. ;
- Des perturbations de la reproduction : fécondité, maturation sexuelle, fructification, etc. ;

- Des perturbations physiologiques : croissance, hormones, expression génomique, etc. ;
- Des modifications de relation entre espèces : compétition, prédation, pollinisation, etc. ;
- Des altérations des capacités visuelles.

Les effets de répulsion sont souvent associés à la relation proie-prédateur où la proie potentielle va éviter un environnement trop éclairé qui la rendrait alors vulnérable. Dans le cas des chiroptères notamment (essentiellement les microchiroptères), certains auteurs associent l'effet de la lumière à celui d'une barrière infranchissable pour les espèces les plus sensibles. Pour cette raison, la lumière est souvent présentée comme un facteur de fragmentation de l'environnement nocturne. Le terme de phototactisme négatif est employé pour désigner l'effet de répulsion. Au cours des recherches effectuées, l'effet de répulsion de la lumière artificielle a été répertorié 11 fois sur différents taxons.

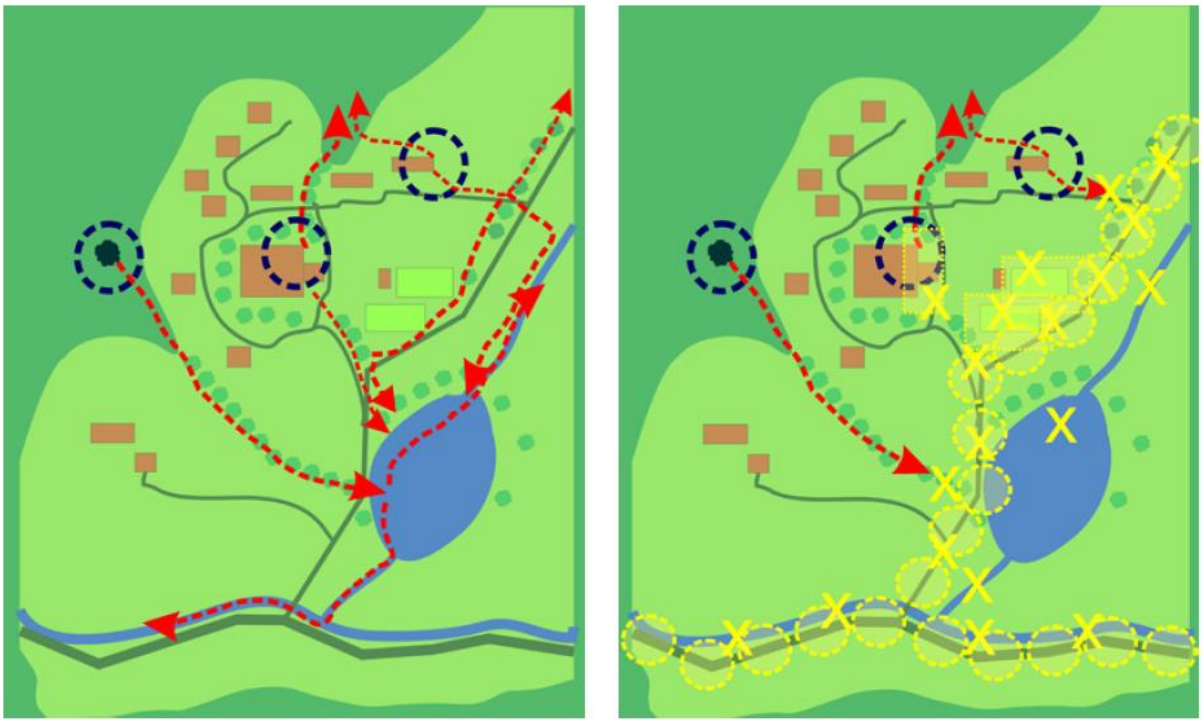


Figure 22: Schéma extrait des lignes directrices pour la prise en considération des chauves-souris dans les projets d'illumination. Réseau schématique de perchoirs (ronds bleus), de voies de déplacement et de zones de recherche de nourriture (flèches rouges) de 3 espèces de chauves-souris dans une situation sans lumières artificielles (image de gauche) et avec (image de droite). Les croix indiquent les endroits où le déplacement dans le paysage est bloqué par les lumières où l'habitat n'est plus fonctionnel. (Source : VOIGT C. C. et al., 2018).

La figure ci-dessus vient illustrer l'effet de répulsion générant une fragmentation de l'environnement nocturne et altérant les déplacements de trois espèces de chauve-souris.

Les effets d'attraction trouvent leur origine principalement dans deux phénomènes : la désorientation des animaux dans leurs déplacements et l'utilisation de la lumière comme un piège lumineux favorable à la prédation. De nombreux animaux utilisent les sources naturelles de lumière nocturnes provenant des objets célestes comme repères dans leur déplacement. La lumière artificielle vient masquer ces repères et se substitue à eux en attirant inexorablement les individus. Il est rapporté que les collisions et échouages d'oiseaux sont plus particulièrement fréquents en période de forte nébulosité (brume, pluie) où les sources de lumière artificielle seraient males interprétées. C'est le cas de nombreux

insectes dont leur accumulation autour des lampes est un spectacle familier. L'effet de piégeage systématique généré par la lumière artificielle est aussi considéré comme un effet barrière. Ce phénomène d'attirance à la lumière est appelé phototactisme positif. L'attraction vers les sources lumineuses artificielles peut aussi être liée à l'opportunisme de certaines espèces prédatrices qui viennent profiter de l'accumulation de proies. Ce comportement est notamment observé chez des espèces sauvages comme les chauves-souris, les oiseaux, les calamars, les poissons mais également chez de nombreuses espèces exotiques introduites par l'homme comme les chats et certains geckos. Au cours des recherches effectuées, l'effet d'attraction de la lumière artificielle a été répertorié 12 fois sur différents taxons.

Les perturbations des comportements rapportés peuvent concerner de nombreux aspects de la vie de la faune comme le déplacement des espèces, notamment durant les migrations. De même, les espèces ayant une véritable aversion à la lumière se voient contraintes de modifier leurs déplacements dans l'espace et d'éviter les zones éclairées. Une modification du régime alimentaire est relevée chez les hérissons qui, dans un milieu éclairé artificiellement, se nourrissent d'un cortège d'espèces modifié par la pollution lumineuse. La modification des vocalisations de la grenouille *Rana clamitans malanota* est également rapportée. De manière plus générale, le dérèglement du rythme circadien des espèces est souvent évoqué avec notamment une modification des phases naturelles de sommeil ou d'alimentation. Au cours des recherches effectuées, des perturbations du comportement liées à la lumière artificielle ont été répertoriées 23 fois pour différents taxons.

Les perturbations de la reproduction peuvent être liés à des phénomènes physiologiques affectant la fécondité, la maturation sexuelle ou de manière plus générale la phénologie des espèces. Dans le cas de certains mollusques il s'agit du nombre d'œufs pondu, du taux de survie des jeunes ou la maturation des gonades va être affecté. Les lucioles voient leurs activités de reproduction particulièrement perturbées par la lumière artificielle qui vient masquer les signaux lumineux émis par les femelles qui sont alors moins visibles pour les males, diminuant ainsi les chances d'accouplement. La floraison des végétaux est également très affectée par la lumière artificielle. Dans certains cas, la fructification des plantes peut même être arrêtée (exemple du maïs). Au cours des recherches effectuées, des perturbations de la reproduction liées à la lumière artificielle ont été répertoriées 20 fois pour différents taxons.

Des processus physiologiques sont également perturbés par la lumière artificielle comme la croissance ou la production d'hormones. Les résultats des recherches montrent que la production de 7 hormones différentes peut être perturbée chez les animaux : testostérone, mélatonine, corticostérone, thyroxine, hormone LH, œstradiol et cortisol. Bien entendu, chaque hormone ayant des fonctions bien définies, se sont l'ensemble des processus physiologiques associés qui sont potentiellement affectés. Chez le corail, les performances de la photosynthèse sont altérées par l'exposition à la lumière artificielle. Une appariation de lésions sur le feuillage de certaines plantes exposées à la lumière artificielle et à l'ozone en bord de route, met en évidence une altération des capacités de l'organisme à se restaurer. Au cours des recherches effectuées, des perturbations physiologiques liées à la lumière artificielle ont été répertoriées 36 fois pour différents taxons.

Les modifications des relations inter-espèces dans un environnement soumis à la pollution lumineuse sont couramment évoquées dans la littérature, avec notamment la compétition alimentaire, les relations proie-prédateurs ou la pollinisation qui est un sujet d'une importance majeure pour le

maintien des espèces végétales. De nombreux vecteurs de la pollinisation, incluant les insectes et les chiroptères, ne jouent plus efficacement leur rôle compromettant ainsi le succès de la reproduction des végétaux et le maintien des écosystèmes associés. Plus subtile, la relation symbiotique entre les coraux et les microalgues qu'ils abritent semblent également compromise par la pollution lumineuse qui modifie la densité en microalgues dans les polypes coraliens. Au cours des recherches effectuées, des modifications des relations inter-espèces liées à la lumière artificielle ont été répertoriées 6 fois pour différents taxons.

Enfin, l'altération des capacités visuelles est également rapportée. Elle peut être liée à une exposition à une source lumineuse artificielle trop intense entrainant alors des lésions oculaires, c'est le cas pour les poissons abyssaux, ou une altération temporaire de la vision après un éblouissement comme évoqué pour les grenouilles nocturnes. L'altération de la vision peut également provenir de la modification du spectre lumineux naturel engendrant alors une modification de la perception des couleurs chez certaines espèces comme cela a été montré chez un papillon de nuit. Au cours des recherches effectuées, des altérations des capacités visuelles liées à la lumière artificielle ont été répertoriées 3 fois pour différents taxons.

La description proposée ci-avant concernant les différents effets de la pollution lumineuse est très synthétique et simplifiée, mais il existe des effets plus ou moins complexes sur les organismes et leurs cycles de vie. La difficulté à comprendre et connaitre les perturbations de la pollution lumineuse est liée à l'hétérogénéité des connaissances et à la grande diversité des effets constatés.

Le schéma ci-dessous extrait de BOYES D. H. *et al.* 2021 permet de mieux illustrer la complexité des effets directs et indirects de la pollution lumineuse identifiés pour les papillons de nuit dans le cadre de leur travail de synthèse.

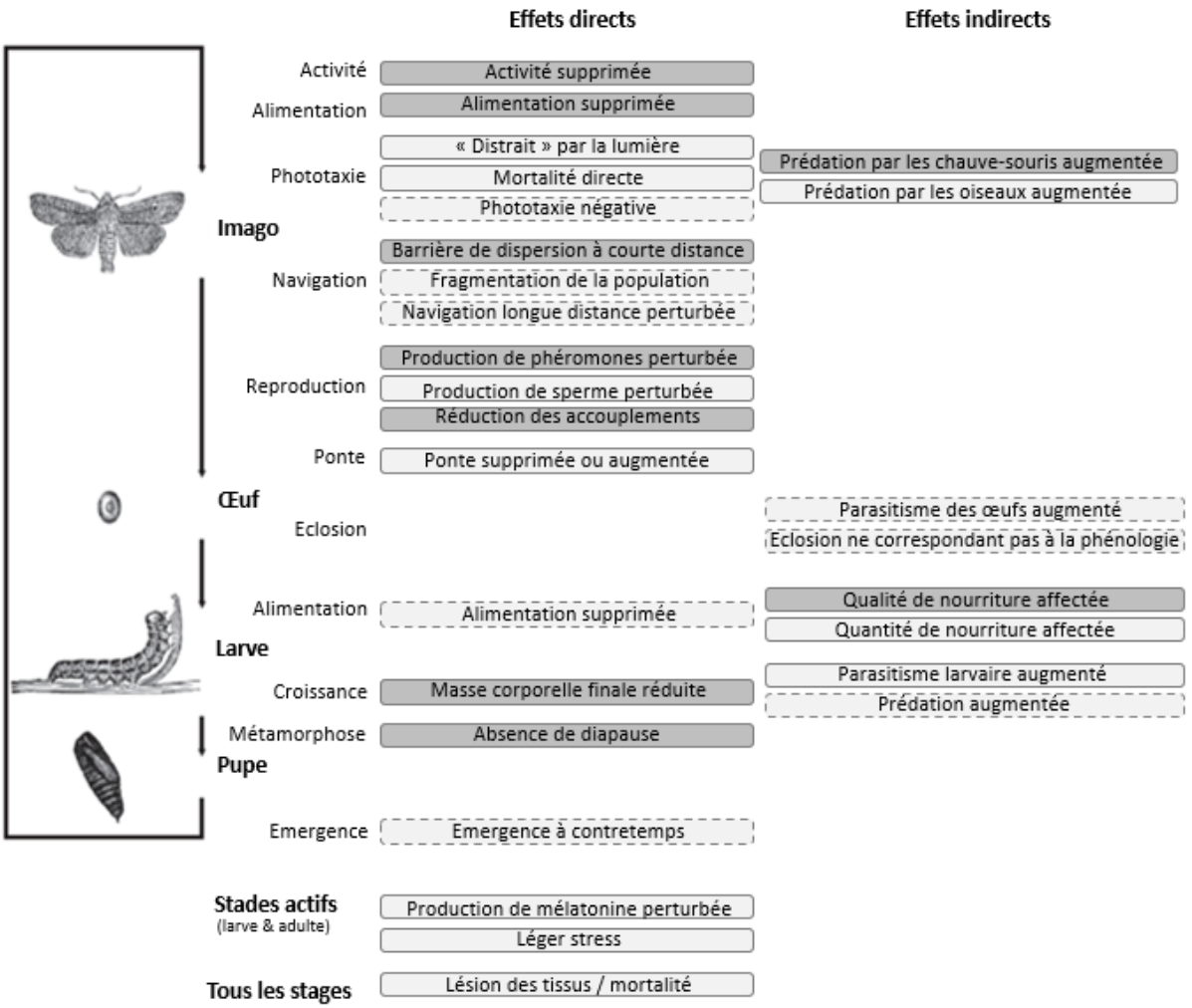


Figure 23: Figure traduite depuis le schéma publié dans BOYES D. H. et al. 2021 illustrant les effets de la lumière artificielle sur le cycle de vie des papillons de nuit. Les boites en gris foncé correspondent à des effets bien démontrés, c'est-à-dire, pour au moins une espèce de papillon de nuit dans des conditions de lumière réalistes. Les boites en gris clair correspondent à des effets moins bien démontrés, c'est-à-dire, issus de travaux réalisés dans des conditions de forte intensité lumineuse ou sur d'autres taxons d'insectes. Enfin, les boites entourées de pointillés gris correspondent à des effets plausibles mais qui n'ont pas ou peu été démontrés.

4.2.2. Influence de la nature des sources lumineuses

Comme indiqué dans les propos introductifs, les effets de la pollution lumineuse sont intimement liés à la quantité de lumière et aux longueurs d'ondes émises. Le sujet du spectre lumineux des éclairages revêt donc une importance toute particulière avec l'émergence des technologies utilisant des diodes électroluminescentes - LED (Light-Emitting Diode en anglais). Avec un coût d'achat modérément plus élevé que les technologies classiques et une consommation électrique beaucoup plus faible, le rapport coût-bénéfice est très favorable à l'usage des LED qui sont largement employées, notamment dans la rénovation des parcs d'éclairages publics. L'association Française de l'Éclairage - AFE rapporte qu'en 2017 les trois quarts des lampes vendues en France étaient des LED.

La lumière est une onde électromagnétique qui vibre à différentes fréquences. C'est l'ensemble des longueurs d'ondes de la lumière qui constitue son spectre. Le spectre lumineux varie notamment en

fonction des technologies qui sont employées et qui peuvent être classées en trois catégories (SORDELLO R., 2017) :

- Les lampes à incandescence correspondant à une ampoule contenant un filament traversé par un courant électrique.
- Les lampes à décharge constituées d'une ampoule contenant un gaz qui émet des photons en réponse à des décharges électriques.
- Les LED, constituées de Diodes électroluminescentes qui sont des dispositifs produisant un rayonnement lorsque traversées par un courant électrique.

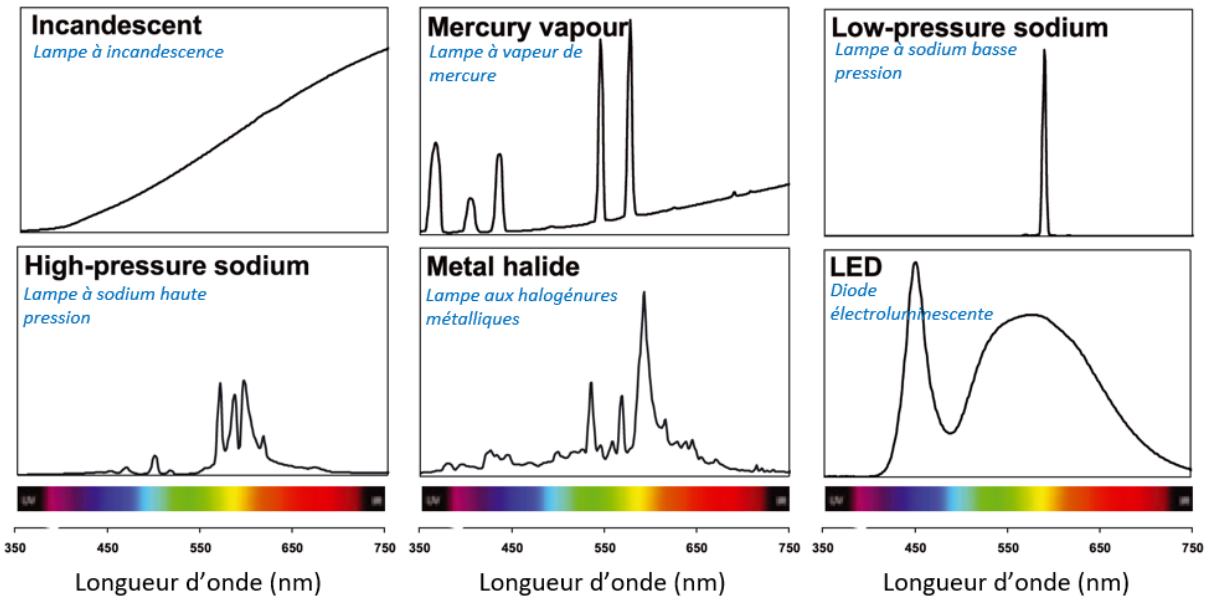


Figure 24: graphiques présentant le spectre lumineux provenant de différents équipements. Extrait de GASTON K. J. et al. 2013.

Nombreuses études s'intéressent à l'influence du spectre lumineux dans les perturbations causées par les lumières artificielles. La réponse des organismes vivants à la lumière artificielle dépend des longueurs d'ondes perçues.

Dans une étude menée par MUSTERS C. J. M. *et al.* 2009 et réexploitée dans SORDELLO R. 2017, une synthèse des effets de la lumière artificielle sur différents groupes faunistique et floristique en fonction des longueurs d'ondes émises est effectuée.

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

Figure 25: Tableau extrait de SORDELLO R. 2017 représentant les types d'impacts en fonction des longueurs d'ondes et pour différents groupes biologiques d'après la revue bibliographique effectuées dans MUSTERS et al. 2009.

La figure précédente permet de constater que toutes les longueurs d'onde considérées engendrent des impacts. Toutefois, le travail de synthèse et d'analyse effectué dans SORDELLO R. 2017 conclu sur un effet moindre des longueurs d'ondes correspondant à l'orange et à l'infra-rouge. Bien qu'il y ait des exceptions, ce résultat est bien en accord avec la plupart des études et recommandations qui indiquent que les éclairages proches de l'orange, que l'on qualifie de couleur « chaude », semble la moins perturbante pour la biodiversité. A contrario, les longueurs d'ondes correspondant aux couleurs bleu et rouge, suivi du vert, sont les plus néfastes compte tenu des nombreux impacts constatés. A ce titre, le spectre lumineux des LED classiques qui est composé en grande partie de bleu (450 -500 nm) est jugé particulièrement problématique.

Concernant l'intensité lumineuse, les connaissances montrent que plus celle-ci est élevée plus des perturbations de la biodiversité sont à prévoir toutefois, le seuil de tolérance des espèces est très variable. Des espèces nocturnes vont montrer une très grande sensibilité, par exemple, des niveaux d'illumination se rapprochant de la luminosité naturelle d'un soir de pleine lune suffiront à déclencher des perturbations.

4.2.3. Niveaux d'organisation biologiques concernés

Une grande partie des études disponibles s'intéressent aux effets de la pollution lumineuse à l'échelle des individus, qui plus est, parfois uniquement sur une partie de leur stade de développement. Dans une perspective de gestion, il est toutefois nécessaire d'avoir une approche plus holistique permettant de comprendre les impacts sur des niveaux d'organisation biologique plus importants. Dans ZAPATA M. J. *et al.* (2018), les répercussions de cette pression environnementale en milieu estuarien sont étudiées sur les niveaux suivants : individus, population, espèce, communauté d'espèces, chaine alimentaire et écosystème.

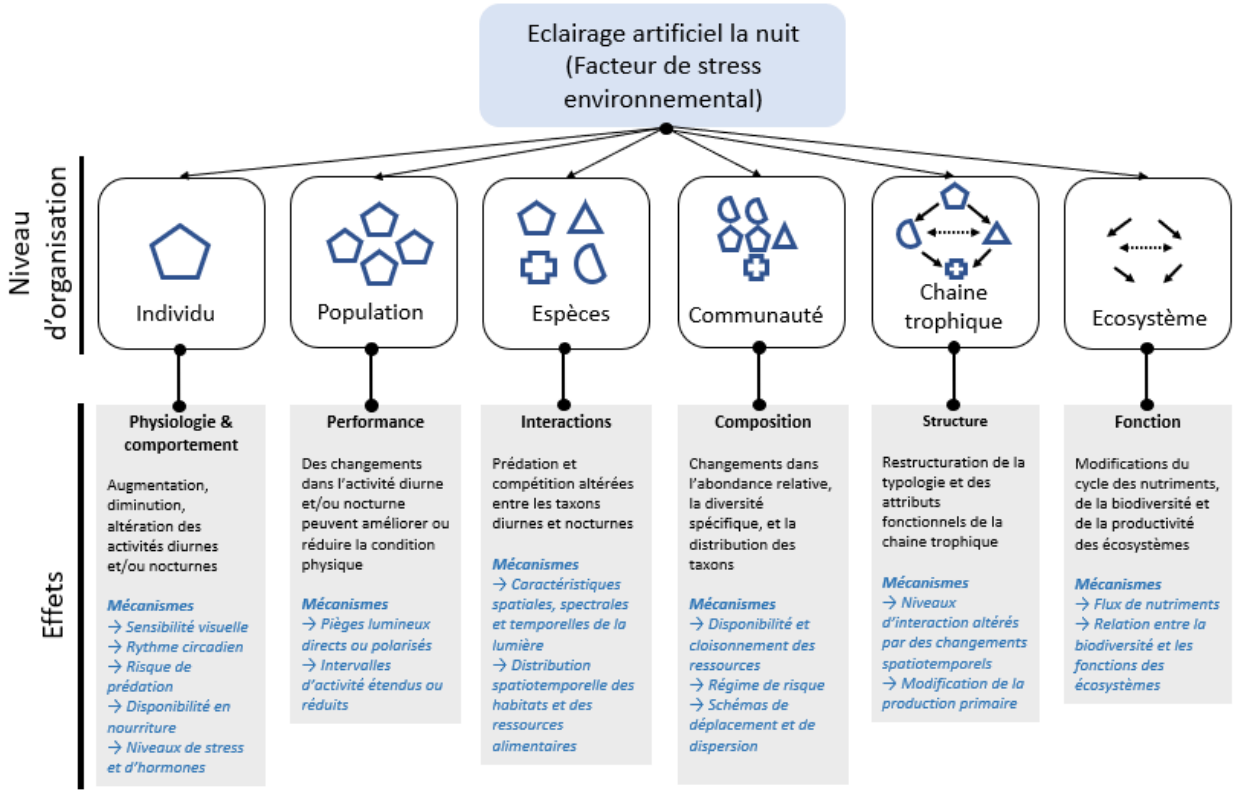


Figure 26: Le schéma ci-dessus est traduit depuis une figure publiée dans ZAPATA M. J. et al. *2018. Il présente les différents niveaux d'organisation du vivant considérés pour l'analyse de l'effet de lumière artificielle en milieu estuarien ainsi que les effets potentiels recherchés et quelques mécanismes associés.*

La figure ci-dessus illustre bien l'emboitement des différents niveaux d'organisation biologique qui sont tous interdépendants. L'étude de ZAPATA M. J. *et al.* (2018) conclue sur la nécessité de mener des efforts de recherche sur les axes suivants :

- Caractérisation des changements naturels de la luminosité dans les habitats estuariens pour aider les gestionnaires à prédire les impacts (intensité, composition spectral et temporalité) ;
- Les réponses biologiques peuvent varier en fonction de l'ampleur, la durée, la fréquence et la prévisibilité de l'exposition à la lumière artificielle. Les recherches futures devront donc s'efforcer de comprendre ces variables dans les systèmes aquatiques et terrestres avec des études contrôlées sur le long terme ;
- Les recherches futures devraient établir des liens entre les effets connus de la lumière naturelle et artificielle sur la physiologie des individus et l'écologie des communautés, pour évaluer les effets potentiels sur les processus à l'échelle de l'écosystème estuarien et les réponses fonctionnelles telles que la connectivité et la productivité.
- Enfin, l'établissement des mécanismes en œuvre entre les réponses à la lumière artificielle à tous les niveaux de l'organisation biologique serait déterminant dans la prédiction des effets et conséquences écologiques de la pollution lumineuse sur les zones côtières et dans le développement de mesures d'atténuation adaptées.

Ces conclusions formulées pour les zones estuariennes peuvent très certainement être étendues à l'ensemble des écosystèmes.

Dans la même étude, des éléments synthétiques concernant les résultats des principaux travaux scientifiques s'étant intéressés à l'effet de la lumière artificielle nocturne sur des communautés ou des écosystèmes sont donnés. Les deux tableaux suivants ont été traduits depuis les informations synthétiques rapportées dans ZAPATA M. J. *et al.* 2018.

Ecosystème concerné	Niveau d'organisation étudié	Région géographique	Latitude	Principaux résultats	Référence bibliographique
Estuaire	Communauté	Afrique du Sud	Subtropicale	L'ajout de lumière artificielle la nuit, sous l'eau, a entraîné une réduction de l'activité exploratoire et une augmentation de la formation de bancs par les poissons de petite taille, ainsi qu'une augmentation de l'abondance des poissons de grande et de petite taille.	BECKER *et al.* (2013)
Plage	Communauté	Floride, USA	Subtropicale	L'ajout de lampes à sodium basse pression et de lumière incandescente a entraîné une réduction de l'utilisation de portions d'habitat éclairé et une réduction de l'effort de recherche de nourriture (nombre de graines récoltées) par des rongeurs nocturnes.	BIRD *et al*. (2004)
Marin	Communauté	Sydney, Australie	Subtropicale	L'ajout de lumière artificielle la nuit a entraîné une augmentation de la prédation des poissons et une modification de la structure de l'assemblage des invertébrés sessiles.	BOLTON *et al*. (2017)
Prairie	Communauté	Cornouailles , Royaume-Uni	Tempérée	L'ajout de lampes à sodium haute pression sont corrélés à une augmentation de l'abondance des taxons prédateurs et nécrophages.	DAVIES *et al.* (2012)
Estuaire	Communauté	Écosse, Royaume-Uni	Tempérée	Un oiseau de rivage commun (*Tringa totanus*) est passé d'une tactique de recherche de nourriture tactile à une tactique de recherche de nourriture visuelle sous un fort éclairage (naturel et artificiel combinés), avec des implications sur l'effort de recherche de nourriture et les interactions prédateur-proie.	DWYER *et al.* (2013)
Eau douce	Communauté	New York, USA	Tempérée	L'ajout de lumière artificielle la nuit a limité la distribution verticale d'un crustacé benthique-pélagique (Mysidaceae) pendant le jour et la nuit à des degrés variables qui dépendaient de la saison. La distribution des Mysidacés était plus limitée en août et octobre qu'en mai.	GAL *et al.* (1999)
Eau douce	Communauté	Province de Trente, Italie	Tempérée	L'ajout de lumière artificielle la nuit a modifié les communautés du périphyton au cours des premiers stades de développement, en diminuant la biomasse globale de 43 à 57 % (en fonction de la saison) et en modifiant la structure de l'assemblage.	GRUBISIC *et al.* (2017)
Eau douce	Communauté	Texas, USA	Subtropicale	L'ajout de lumière artificielle la nuit a conduit à une diminution de 37% de l'abondance de la dérive nocturne des invertébrés aquatiques (notamment pour les Baetidae et les Simuliidae).	HENN *et al.* (2014)
Eau douce	Communauté/ Écosystème	Allemagne	Tempérée	L'ajout de lumière artificielle la nuit à court terme a perturbé les changements saisonniers dans la composition de la communauté microbienne et la respiration nocturne de la communauté. L'ajout de lumière artificielle la nuit sur le long terme a entraîné une production nette positive de l'écosystème.	HÖLKER *et al.* (2015)
Prairie	Communauté	Allemagne	Tempérée	Un dispositif expérimental à grande échelle dans des prairies a été mis en place pour examiner les effets à court et à long terme de la lumière artificielle la nuit sur le comportement, les interactions entre espèces, la physiologie et la composition spécifique des communautés. Une étude à court terme a montré une augmentation spectaculaire de l'abondance des insectes et des araignées sous lumière artificielle la nuit.	HOLZHAUER *et al.* (2015)
Forêt/Urbain	Communauté	Panama	Tropicale	L'abondance des insectes et l'activité des chauves-souris insectivores étaient plus élevées au niveau des lampadaires que dans les habitats forestiers pendant la saison des pluies. Les espèces étaient réparties dans l'utilisation de micro-habitats liés à différents types de lampadaires (bleu, jaune et orange).	JUNG & KALKO (2010)

Figure 27: Tableau (1/2) synthétisant les principaux résultats relatifs à l'étude des effets de la lumière artificielle nocturne sur les communautés et les écosystèmes dans le monde. Informations traduites depuis ZAPATA M. J. et al. *2018.*

Ecosystème concerné	Niveau d'organisation étudié	Région géographique	Latitude	Principaux résultats	Référence bibliographique
Étang d'eau douce	Communauté	Province de Frise, Pays-Bas	Tempérée	L'ajout de lumière artificielle nocturne a modifié le modèle de vol des chauves-souris et réduit l'effort de recherche de nourriture dans les zones éclairées, bien que l'abondance des insectes ait augmenté.	KUIJPER *et al.* (2008)
Terrestre	Écosystème	Costa Rica	Tropicale	Dans une étude d'alimentation contrôlée, les chauves-souris ont choisi de se nourrir dans des compartiments plus sombres que dans des habitats faiblement éclairés. Les fruits étaient moins susceptibles d'être récoltées par les chauves-souris frugivores lorsqu'ils étaient éclairés par un lampadaire, avec des implications négatives pour la biodiversité forestière.	LEWANZIK & VOIGT (2014)
Eau douce et ripisylve	Communauté/ Écosystème	Allemagne	Tempérée	L'ajout de lumière artificielle la nuit a conduit à une réduction de l'émergence des insectes aquatiques, de l'abondance des insectes volants et des coléoptères terrestres nocturnes, ainsi qu'à une augmentation de l'activité des prédateurs terrestres, ce qui a des implications sur les flux entre milieu terrestre et aquatique.	MANFRIN *et al.* (2017)
Eau douce et ripisylve	Communauté	Ohio, USA	Tempérée	L'ajout de lumière artificielle nocturne a été corrélé à une réduction des densités d'araignées riveraines, ainsi qu'à la richesse des familles et à la taille des insectes aquatiques émergents, et à une plus grande taille des arthropodes terrestres.	MEYER & SULLIVAN (2013)
Marin	Communauté	Grande barrière de corail, Australia	Subtropicale	Les pièges à LED et à lumière halogène ont attiré une plus grande abondance d'amphipodes pour toutes les espèces. Les pièges à LED ont eu un effet plus important sur la faune émergente, augmentant les abondances de *Guernea spp.* jusqu'à 80 fois.	NAVARRO-BARRANCO & HUGHES (2015)
Eau douce	Communauté	Allemagne	Tempérée	L'ajout de lampes à sodium haute pression a attiré au moins 27 fois plus d'insectes (surtout des insectes aquatiques).	PERKIN *et al.* (2014a)
Eau douce	Communauté	Colombie-Britanique	Tempérée	L'ajout de lumière artificielle à court terme dans des cours d'eau a entraîné une réduction de 50 % de l'abondance des invertébrés dérivant, mais n'ont pas affecté les autres niveaux trophiques.	PERKIN *et al.* (2014b)
Eau douce	Communauté	Hongrie	Tempérée	Un bâtiment réfléchissant a créé une nouvelle interaction prédateur-proie dans laquelle les oiseaux se sont systématiquement nourris de trichoptères polarotactiques attirés par les surfaces polarisées.	ROBERTSON *et al.* (2010)
Forêt/Urbain	Communauté	Suède	Tempérée	Les chauves-souris qui se nourrissent à proximité des lampadaires vers lesquels les insectes sont attirés présentent un apport énergétique plus élevé.	RYDELL (1992)
Estuaire	Communauté	Portugal	Tempérée	La lumière artificielle nocturne a entraîné une augmentation de la consommation de proies chez les échassiers.	SANTOS *et al.* (2010)
Eau douce et ripisylve	Communauté/ Écosystème	Ohio, USA	Tempérée	Des niveaux modérés à élevés de lumière artificielle nocturne ont eu un impact sur la composition des communautés d'invertébrés en favorisant les prédateurs et les détritivores. La lumière artificielle nocturne a également modifié la longueur de la chaîne alimentaire des invertébrés et les flux d'énergie entre les écosystèmes aquatiques et terrestres.	SULLIVAN *et al.* (2018)
Eau douce	Communauté	Galles du Sud, Royaume-Uni	Tempérée	Les traitements par ajout de lumière artificielle nocturne ont permis de réduire l'activité et les interactions d'une écrevisse non indigène et envahissante, ce qui constitue un outil de gestion des effets négatifs de cette espèce exotique envahissante.	THOMAS *et al.* (2016)

Figure 28: Tableau (2/2) synthétisant les principaux résultats relatifs à l'étude des effets de la lumière artificielle nocturne sur les communautés et les écosystèmes dans le monde. Informations traduites depuis ZAPATA M. J. et al. *2018.*

Dans les deux figures précédentes, 23 études scientifiques publiées ont été identifiées. Elles abordent toutes les effets de la lumière artificielle nocturne sur des niveaux d'organisation biologiques correspondant aux communautés et/ou aux écosystèmes. Seules 5 études sur les 23 concernent le niveau d'organisation le plus complexe correspondant aux écosystèmes. Une majorité de ces études concernent des zones tempérées, 17 au total, alors que 6 d'entre elles correspondent à des latitudes subtropicales ou tropicales. Les écosystèmes étudiés sont principalement terrestres, avec 18 études contre 5 études consacrées à des écosystèmes marins.

Au niveau des communautés d'organismes vivants, les effets perturbateurs de la pollution lumineuse concernent principalement les aspects suivants :

- Modification de la richesse spécifiques ;
- Modification de l'abondance de certains taxons ;
- Modification de la biomasse de certains taxons ;
- Modification du métabolisme (respiration, apport énergétique) ;
- Modification de l'usage spatio-temporel des habitats ;
- Modification de la taille des individus de certains taxons ;

Au niveau des écosystèmes, les effets perturbateurs de la pollution lumineuse concernent principalement les aspects suivants :

- Modification des relations interspécifiques (relation proie-prédateur notamment) ;
- Modification des assemblages d'espèces ;
- Modification de la chaine alimentaire ;
- Modification de la productivité de l'écosystème (biomasse en producteurs primaires) ;
- Modification des flux d'énergie entre compartiments terrestre et aquatiques ;

L'ensemble de ces considérations démontrent bien qu'au-delà des effets de la pollution lumineuse qui a pu être constatée sur des individus, des répercussions à des niveaux d'organisation plus élevés existent, ce qui sous-entend des enjeux plus importants. Aussi, la perturbation des écosystèmes amène à considérer des enjeux en termes de services écosystémiques.

4.3. Mise en perspective du contexte de la Nouvelle-Calédonie

Les recherches effectuées concernant les impacts connus et décrits de la pollution lumineuse sur la faune et la flore de Nouvelle-Calédonie montrent que le phénomène reste peu caractérisé. Les impacts décrits ne concernent que la faune, avec les oiseaux marins principalement, et de manière plus anecdotique, les tortues marines et les chiroptères.

La synthèse des effets connus au niveau international laisse bien entrevoir d'importantes lacunes dans les connaissances locales compte tenu du panorama étendu des perturbations engendrées par la lumière artificielle nocturne, avec une grande diversité de taxons faunistique et floristique dans une gamme variés de milieux naturels, et à des niveaux d'organisation biologiques allant de l'individus jusqu'à l'écosystème aquatique ou terrestre.

Dans le contexte calédonien, certains impacts rapportés au niveau international interpellent plus particulièrement avec notamment les perturbations révélées au niveau :

- du corail qui joue un rôle primordial dans les écosystèmes marins de Nouvelle-Calédonie ;
- des poissons récifaux, qui représentent notamment une importante ressource vivrière ;
- des chauves-souris frugivores, qui ont un rôle déterminant dans le maintien des forêts via la pollinisation et la dispersion des graines ;
- des plantes, avec un taux d'endémisme proche des 80% sur le territoire et près de 20% des espèces évaluées comme menacées d'extinction par l'UICN (source Endemia) ;
- des insectes qui jouent un rôle déterminant dans les écosystèmes terrestres avec notamment une fonction clé dans la pollinisation des plantes et une place importante dans la chaine trophique. Les insectes de Nouvelle-Calédonie rassemblent également de nombreuses espèces endémiques ;
- des mollusques terrestres avec notamment l'existence de 17 taxons de bulimes et une part d'endémisme importante sur ce taxon ;
- des lézards, dont les geckos qui sont principalement des espèces nocturnes avec un fort taux d'endémisme et plusieurs espèces menacées d'extinction en Nouvelle-Calédonie ;
- A noter enfin l'existence d'un oiseau nocturne fréquent en Nouvelle-Calédonie, la chouette effraie, dont le maintien va être étroitement corrélé à la qualité de l'environnement nocturne.

5. Mesures de gestion relatives à la pollution lumineuse en Nouvelle-Calédonie

Dans la partie suivante, l'ensemble des mesures de gestion locales relatives à la prise en considération de la pollution lumineuse identifiées durant les recherches sont présentées.

5.1. Textes et règlementation

Pour apprécier la prise en considération de la pollution lumineuse dans les politiques publiques, nous avons consulter les documents suivants :

- Codes de l'environnement des trois provinces ;
- Délibération N°2011-110/APN relative à la publicité, aux enseignes et pré enseignes ;
- Arrêtés d'autorisation délivrés par les provinces ou la Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Energie de Nouvelle-Calédonie- DIMENC dans le cadre de divers projets ;
- Documents stratégiques relatifs à l'aménagement urbain ;
- Documents stratégiques relatifs à la transition énergétique.

- ***Codes de l'environnement***

Province Sud : La prise en considération de la pollution lumineuse intervient à différents niveaux dans le code de l'environnement de la province Sud (2021). Elle est citée de manière générale comme un facteur de perturbation potentielle à prendre en considération dans les évaluations environnementales et en particulier comme une nuisance possible du voisinage (étude d'impact et autres) (articles 130-4, 240-5 et 413-4). La production de lumière est prohibée sur les sites de ponte de tortues en période de ponte et d'émergence (article 240-3). Enfin, les sections 2 et 3 dédiées respectivement aux enseignes lumineuses et aux publicités lumineuses, reprennent un certain nombre de mesures à respecter concernant leur utilisation. Les détails sont donnés ci-après :

- **L'article 130-4** relatif à l'évaluation environnementale prévoit concernant la réalisation de tout aménagement ou projet qu'une « analyse des effets directs et indirects, temporaires et permanents du projet sur l'environnement » doit être réalisée « et en particulier sur la faune et la flore, les sites et paysages, le sol, l'eau, l'air, le climat, les milieux naturels et les équilibres biologiques, sur la protection des biens et du patrimoine culturel et, le cas échéant, sur la commodité du voisinage (bruits, vibrations, odeurs, **émissions lumineuses**, poussières) ou sur l'hygiène, la santé, la sécurité et la salubrité publiques » ;
- **L'article 240-5** relatif à la protection des espèces endémiques, rares ou menacées, et dans lequel il est indiqué qu'une « analyse, en relation avec l'importance des travaux et aménagements envisagés ainsi qu'avec leurs incidences prévisibles sur l'environnement » doit être effectuée avec, « le cas échéant », une prise en considération des « **émissions lumineuses** » concernant « la commodité du voisinage ».
- **L'article 413-4** relatif aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement - ICPE, prévoit « Une analyse des effets directs et indirects, temporaires et permanents de l'implantation et de l'exploitation de l'installation sur l'environnement et, en particulier, sur les sites et paysages, la faune et la flore, les milieux naturels et les équilibres biologiques, sur la commodité du voisinage (bruit, vibrations, odeurs, **émissions lumineuses**) »
- **L'article 240-3,** relatif à la protection des espèces endémiques, rares ou menacées, et dans lequel la « perturbation intentionnelle de tortues marines, notamment, l'approche à une distance inférieure à 10 mètres, **la production de lumière** ainsi que l'introduction de chiens sur les sites et en période de ponte et d'émergences » sont prohibés.
- **Le titre IV : « Prévention des nuisances visuelles »** du code de l'environnement concerne notamment les **enseignes** et **publicités lumineuses**, en mentionnant un certain nombre de mesures à respecter concernant leur exploitation. Les **articles 441-12 et 442-5** imposent notamment l'extinction des enseignes entre minuit et 06h00. Des articles réglementant les sites d'installation et dimension des enseignes sont également présents. **L'article 441-13** prévoit que les « publicités lumineuses sont interdites dans les communes de moins de 10 000 habitants. ».

Province Nord : Dans le code de l'environnement de la province Nord (2019), la pollution lumineuse est prise en considération notamment par rapport aux perturbations qui peuvent intervenir sur les oiseaux marins ou les tortues marines (articles 252-5 et 252-3) et de manière plus générale, les

émissions lumineuses sont identifiées comme étant une nuisance possible du voisinage (article 154-2). Les détails sont donnés ci-après :

- **L'article 252-3** relatif aux tortues marines, interdit « **la production de lumière** ou l'introduction de chiens sur les sites de pontes en période de pontes et d'émergences (soit en particulier de décembre à mars) ».
- **L'article 252-5** relatif aux oiseaux marins prévoit l'interdiction des « **émissions de lumières** et de sons puissants dans un rayon de 300 mètres des regroupements d'oiseaux marins ».
- **L'article 154-2** relatif au rôle et fonctionnement du comité local d'information stipule que « le champ principal de l'activité du comité est l'impact social et environnemental du projet, au sens large incluant les effets internes et externes, directs et indirects, immédiats et différés, ponctuels ou diffus, isolés ou cumulatifs, temporaires ou permanents sur la faune et la flore, les sites et paysages, le sol, l'eau, l'air, le climat, les milieux naturels et les équilibres biologiques et écologiques, sur la protection des biens et du patrimoine culturel et, le cas échéant, sur la commodité du voisinages et les nuisances (bruits, vibrations, odeurs, **émissions lumineuses**, poussières) ou sur l'hygiène, la santé, la sécurité et la salubrité publiques. »

Province des Îles : Dans le code de l'environnement de la province des Îles (2019), il est fait une seule mention spécifique des émissions lumineuses dans l'article 412-4 relatif aux demandes applicables aux installations soumises à autorisation. Il est indiqué que la demande d'autorisation doit être accompagné d'une analyse sur les effets de l'installation en prévoyant la prise en compte des émissions lumineuses comme un facteur de nuisance pour le voisinage. Les détails sont donnés ci-après :

- **Article 412-4** relatifs aux dispositions applicables aux installations soumises à autorisation : « Une analyse des effets directs et indirects, temporaires et permanents de l'implantation et de l'exploitation de l'installation sur l'environnement et, en particulier, sur les sites et paysages, la faune et la flore, les milieux naturels et les équilibres biologiques, sur la commodité du voisinage (bruit, vibrations, odeurs, **émissions lumineuses**) ou sur l'agriculture, l'hygiène, la santé, la salubrité et la sécurité publiques et sur la protection des biens matériels et du patrimoine culturel. »

- ***Délibération N°2011-110/APN relative à la publicité, aux enseignes et pré enseignes (province Nord)***

Il s'agit d'une délibération adoptée en 2011 par la province Nord pour cadrer les pratiques en matière de publicité. La chapitre II de cette délibération regroupe dans les articles 20 à 24 des prescriptions applicables à la publicité lumineuse en agglomération.

Les prescriptions indiquées ont essentiellement vocation à définir les zones interdites à l'installation de publicité lumineuse.

Remarque : En 2021, l'Exécutif de la province Nord a souhaité qu'un travail soit engagé afin que cette délibération puisse être intégrée au code de l'environnement de la province Nord, (livre IV

PREVENTION DES POLLUTIONS RISQUES ET NUISANCES, titre IV PREVENTION DES NUISANCES). Un travail est actuellement en cours concernant la rédaction d'un nouveau texte réglementaire.

- ***<u>Prescriptions réglementaires imposées dans le cadre d'arrêtés</u>***

Cette partie rassemble 10 arrêtés dans lesquels des prescriptions relatives à l'usage de la lumière artificielle ont été relevées sur la période 2013-2021. Les arrêtés ont été récupérés depuis le site juridoc.gouv.nc. Cette recherche est loin d'être exhaustive en raison de la difficulté à effectuer des recherches rapides depuis le moteur de recherche disponible (nécessité de télécharger les arrêtés complets contenus dans le journal officiel avant d'effectuer des recherches dans les textes). Les arrêtés identifiés ont été produits par la province Nord, la province Sud (service DENV devenu DTTT) et la DIMENC. Ces arrêtés correspondent principalement à des autorisations de défrichements dans le cadre d'exploitations minières ou d'aménagements, et à des autorisations délivrées pour l'exploitation d'Installations Classées Protection de l'Environnement – ICPE. Ces arrêtés comportent tous des prescriptions relatives à la lumière artificielle avec des niveaux de détails très variables :

- Demande générale de limiter les nuisances lumineuses ;
- Demande de prise en considération des recommandations de la Société Calédonienne d'Ornithologie – SCO pour limiter les impacts sur les oiseaux marins avec prise en considération de l'orientation des éclairages et du type d'équipement employé ;
- Demande d'optimisation des éclairages et de suivi des échouages d'oiseaux marins (projet minier de Goro) ;
- Demande de suivi de la faune sensible à la lumière artificielle et de mise en place de mesures de protection : oiseaux marins et chiroptères (SLN).

Le détail des arrêtés, et extraits concernant les prescriptions, est donné ci-dessous :

- ***Arrêté n° 1172-2013/ARR/DENV du 7 mai 2013*** *portant dérogation relative aux espèces protégées et autorisation de défrichements par la société Vale Nouvelle-Calédonie S.A.S. pour l'aménagement des phases « 1a » et « 1b » d'un Stock de minerai long terme « SMLT », bassin de la Kwé, commune de Yaté.* Cet arrêté prévoit des dispositions sur l'orientation des éclairages : « les éclairages mis en place sur le site de stockage « SMLT » sont conçus de manière à éviter l'éclairage des milieux naturels environnant ; ils sont orientés vers le sol ». La lumière artificielle est également considérée comme un facteur de perturbation dont les impacts sur la biodiversité pourront être suivis : « une « zone atelier » (voir plan annexé) ouverte aux instituts de recherche présents en Nouvelle-Calédonie afin d'y mener des programmes d'amélioration des connaissances en matière de suivi et de fonctionnement des milieux forestiers et para-forestiers, et de la biodiversité associée. [...] ces opérations portent *a minima* sur les thématiques suivantes et couvrent l'ensemble de la « zone atelier » en comprenant des zones témoins et des zones impactées : [...] suivi des sources de perturbations (**lumière**, son, poussières, etc) et évaluation de leurs impacts sur la biodiversité ».
- ***Arrêté n° 1164-2013/ARR/DENV du 13 mai 2013*** *portant autorisation de défrichements par la société Vale Nouvelle- Calédonie S.A.S. pour la réalisation d'une campagne de sondages géologiques « KO5 (200) », bassin de la Kwé, commune de Yaté.* Dans cet arrêté, il est

mentionné qu'« aucun éclairage n'est mis en place sur les zones de chantier la nuit sauf pour raison de sécurité à proximité des voies de circulation et sauf pour la maintenance et le gardiennage des engins ».

- ***Arrêté n° 743-2015/ARR/DIMENC du 21 avril 2015*** *autorisant l'exploitation du site minier de «Dothio», situé sur la commune de Thio, par la société Le Nickel-SLN.* Dans le cadre de l'exploitation de ce site minier, il n'est pas fait mention de la lumière artificielle, toutefois des mesures de suivi et protection d'espèces sensibles sont imposées avec un « plan de suivi et de préservation de la faune du massif (avifaune) » et un « suivi des populations de chiroptères et mise en œuvre de mesures de protection pour ces espèces sensibles ».
- ***Arrêté n° 2698-2016/ARR/DIMENC du 30 septembre 2016*** *autorisant l'exploitation du site minier de « Goro » situé sur les communes de Yaté et du Mont-Dore, par la société Vale Nouvelle-Calédonie SAS.* Cet arrêté impose à l'exploitant une « **optimisation de l'éclairage** afin de limiter l'impact des pollutions lumineuses sur les populations des oiseaux » ainsi que le « **suivi annuel des échouages des oiseaux marins** sur l'emprise du site ».
- ***Arrêté n° 2017-08/PN du 13 janvier 2017*** *autorisant l'exploitation d'un ouvrage de traitement et d'épuration des eaux résiduaires domestiques ou assimilées par le Sivom eaux et déchets VKP, commune de Pwëbuu (Pouembout) et fixant les prescriptions particulières qui lui sont applicables dans le cadre de la réglementation relative aux installations classées pour la protection de l'environnement.* Dans le cadre de l'exploitation de ses installations (ICPE), l'arrêté prévoit que « l'exploitant prend des dispositions pour **limiter les nuisances lumineuses** ».
- ***Arrêté n° 412-2020/ARR/DDDT du 23 mars 2020*** *portant autorisation de défrichement et de porter atteinte à un écosystème d'intérêt patrimonial, portant dérogation relative aux espèces protégées et fixant les prescriptions environnementales afférentes dans le cadre de la deuxième période quinquennale de l'exploitation de la mine Vulcain par la Société Minière Georges Montagnat (SMGM), Vallée de la Tontouta, commune de Païta.* Cet arrêté impose à l'exploitant des règles sur l'orientation des éclairages et les équipements employés : « **les éclairages des installations** sur site sont orientés vers le sol et sont constitués par des lampes à vapeur de sodium basse tension offrant une très faible attraction pour les oiseaux ».
- ***Arrêté n° 529-2020/ARR/DDDT du 9 avril 2020*** *portant autorisation de réaliser un programme ou projet susceptible d'avoir un impact indirect sur des écosystèmes d'intérêt patrimonial, et fixant les prescriptions environnementales afférentes dans le cadre de la réalisation du Club de Vacances Nature de Deva (CVND), par la S.A.S. Club Vacances Nature de Deva, commune de Bourail.* Dans cet arrêté, les recommandations de la Société Calédonienne d'Ornithologie pour l'atténuation des effets des éclairages sont reprises : « afin de réduire les impacts de la pollution lumineuse sur la faune et la flore, l'ensemble des recommandations formulées par la Société Calédonienne d'Ornithologie pour **la réduction des émissions lumineuses** est mis en œuvre – notamment les éclairages des installations sont orientés vers le sol et sont constitués préférentiellement par des lampes à vapeur de sodium à basse tension offrant une très faible attraction pour les oiseaux ».
- ***Arrêté n° 1020-2020/ARR/DDDT du 5 mai 2020*** *portant autorisation de défrichement et fixant les prescriptions environnementales afférentes dans le cadre de l'exploitation d'une carrière de basalte et de la mise en place d'installations annexes par l'entreprise transport et travaux publics C. MENAOUER, commune de Moindou*. Cet arrêté impose à l'exploitant des règles sur l'orientation des éclairages et les équipements employés : « **les éclairages des**

installations sur site sont orientés vers le sol et sont constitués par des lampes à vapeur de sodium basse tension offrant une très faible attraction pour les oiseaux ».

- ***Arrêté n° 143-2021/ARR/DDDT du 19 mars 2021*** *portant autorisation de défrichement et dérogation relative aux espèces protégées, et fixant les prescriptions environnementales afférentes dans le cadre de la réalisation de zones d'exploitation minière sur les concessions « Fernande Paule », « Opoué réduite » et « Fernandine », site minier d'Opoué, par la Société Le Nickel (SLN), commune de Boulouparis*. Cet arrêté impose à l'exploitant des règles sur l'orientation des éclairages et les équipements employés : « **les éclairages** éventuels sur le site d'exploitation sont orientés vers le sol et sont constitués par des lampes à vapeur de sodium basse tension offrant une très faible attraction pour les oiseaux ».
- ***Arrêté n° 1511-2021/ARR/DDDT du 16 juin 2021*** *portant autorisation de défrichement et fixant les prescriptions environnementales afférentes dans le cadre de la première période quinquennale de l'exploitation des mines "Boindibou-Revanche et Pauline" sur le site minier de Dothio par la société minière Le Nickel (SLN), commune de Thio.* Cet arrêté impose à l'exploitant des règles sur l'orientation des éclairages et les équipements employés : « **les éclairages** des installations sur site sont orientés vers le sol et sont constitués par des lampes à vapeur de sodium basse tension offrant une très faible attraction pour les oiseaux ».

En lien avec les arrêtés d'autorisation, des études d'impact sont réalisées et intégrées dans les dossiers de demandes d'autorisation. L'exemple d'une étude d'impact récente, réalisée par un bureau d'études environnementales local concernant un projet d'aménagement, a été consulté pour étudier la prise en considération de la pollution lumineuse dans cette étape du projet. Dans cet exemple, des mesures d'atténuation des impacts de lumière artificielle nocturne sont données en préconisant une luminosité minimale et une orientation des éclairages vers le sol en faisant référence aux recommandations de la SCO pour limiter l'impact sur l'avifaune nocturne. Au-delà, de ces mesures d'atténuation, la lumière artificielle est identifiée comme un facteur de perturbation environnementale sur tous les stades du projet (chantier puis exploitation). Le détail est donné ci-après :

Résumé non technique. Unité fonctionnelle - Étude d'impact environnemental. Notice d'impact - Lotissement "Les résidence du Vétiver", CAPSE NC, 2020.

Pour les impacts potentiels du projet sur l'environnement, dans la section faune, les « **lumières en cas de travaux nocturnes** » et « **éclairages nocturnes** » sont identifiés. Le document mentionne pour les mesures d'évitement et d'atténuation que « **les éclairages nocturnes** devront avoir une luminosité minimale et l'éclairage devra être dirigé vers le sol, c'est à dire axé sur la sécurité des personnes et la circulation en évitant un éclairage vers le ciel, engendrant gaspillage d'énergie et source de **pollution lumineuse** et d'impact important sur l'avifaune nocturne (recommandations SCO) ».

- ***<u>Stratégies liées à la maitrise de l'énergie</u>***

Le Schéma pour la Transition Énergétique de la Nouvelle-Calédonie – STENC : Le STENC a été publié en 2016 et il est en cours de révision, une nouvelle version devrait être diffusée en 2022. Dans les orientations données par le STENC, on identifie que « lancer des appels à projets sur la **rénovation d'éclairage performant des espaces publics** » fait partie des « pistes d'actions » mentionnée.

Le plan climat énergie de la province Nord : Le document relatif au plan climat énergie de la province Nord, édité en 2019, donne les orientations stratégiques de la province en matière de développement durable et de changement climatique. La maitrise de l'énergie est centrale dans le document ainsi que la diminution des gaz à effet de serre liés aux activités humaines. De manière générale, la préservation des écosystèmes et milieux naturelle est peu citée en dehors du milieu marin.

Le schéma pour la transition énergétique de la province Sud : Le schéma pour la transition énergétique de la province Sud publié en 2017 formalise la stratégie de la province Sud. Parmi les mesures identifiées dans cette stratégie, l'amélioration de « l'efficacité énergétique des équipements de bureaux », cite l'éclairage comme un aspect. L'objectif formulé est que « 80 % des équipements de bureaux du parc provincial devront être performants à l'horizon 2030 (**éclairage LED**, capteur de présence, **systèmes automatiques d'arrêt d'éclairage** et de climatiseurs, équipements informatiques peu énergivores…) ».

- ***Stratégies liées à l'aménagement urbain***

Code de l'urbanisme de Nouvelle-Calédonie, partie législative (2015) : Le code intègre des dispositions générales à décliner dans les règles d'urbanisme en Nouvelle-Calédonie. Aucune mention particulière de la pollution lumineuse n'est faite mais le principe général de viser au développement durable. A ce titre, il est intéressant de constater que la notion de conservation et restauration des continuités écologiques est mentionnée dans **l'article 111-2** : « Les documents d'urbanisme déterminent les conditions permettant d'assurer, dans le respect des objectifs du développement durable […] la préservation des ressources naturelles, de la biodiversité, des écosystèmes, des espaces verts, la préservation et la remise en bon état des **continuités écologiques** ».

Plan d'Urbanisme Directeur- PUD de la ville de Nouméa (2021) : Dans le rapport de présentation du PUD de la ville, nous n'avons pas identifié de mention spécifique sur la prise en considération de la pollution lumineuse mais des principes généraux sur les objectifs du PUD avec la préservation des écosystèmes et leur bon fonctionnement : « permettre le maintien des écosystèmes et leur bon fonctionnement écologique au sein de la ville ». Sur la partie « Règlement » du PUD, les éclairages sont peu abordés. Deux mentions ont été relevées avec 1) les « dispositions communes concernant l'aspect extérieur des constructions » qui prévoit pour les « lucarnes et fenêtres de toit » que « les éclairages zénithaux doivent être évités » et 2) concernant les l' « aspect et éléments extérieurs des constructions », le fait que pour les « devantures et enseignes » « un éclairage blanc par spots directionnels des enseignes en façades » doit être privilégié.

Schéma Directeur d'Aménagement Lumière (SDAL) de la ville de Dumbéa : l'établissement d'un SDAL permet à une commune de définir des orientations et principes pour l'éclairage sur son territoire. Cette réflexion stratégique permet de définir un usage raisonné de la lumière en fonction notamment d'aspects relatifs à la sécurité, l'énergie et à l'environnement (pollution lumineuse). Durant les échanges menés au cours de l'étude, il est apparu que seule la ville de Dumbéa disposerait d'un SDAL. Le document a été établi en 2017-2018 par Cegelec pour le compte de la mairie. Ce document défini les caractéristiques suivantes de l'éclairage public :

- Hauteur et type de mat employé pour les éclairages ;
- Puissance et température de la lumière ;
- Horaires d'allumage et de modulation des éclairages (diminution jusqu'à 50% de l'intensité sans extinction).

Cette stratégie reste indicative et ne s'applique pas règlementairement. Elle est transmise aux promoteurs privés à titre indicatif. La température maximum de la lumière a été fixée à 3000 Kelvins en s'appuyant sur la réglementation métropolitaine en matière de limitation des nuisances liées à la lumière (arrêté 2018).

5.2. Autres mesures de gestion

Au-delà des politiques publiques, des actions de gestion en lien avec la pollution lumineuse ont été identifiées et sont listées ci-après :

Diagnostic des éclairages publics de 8 communes en 2019-2020 : étude réalisée par le groupement IngeNC/ALBEDO et pilotée par L'Agence Calédonienne d'Energie – ACE en partenariat avec les communes de Boulouparis, La Foa, Farino, Houaïlou, Poya, Koné, Touho et Koumac. Cette étude a notamment permis de faire le point sur les installations des éclairages publics (nombre de points lumineux et d'armoires électriques) et de caractériser la consommation électrique associée. Il s'agit d'un préalable indispensable à la mise en place d'un projet de rénovation des équipements. Selon l'ACE, les communes de Canala, Kouaoua et Yaté devrait également se lancer prochainement dans le diagnostic de leurs parcs d'éclairage.

Sensibilisation sur les impacts de la pollution lumineuse sur la faune : durant les recherches effectuées, des travaux de sensibilisation récurrents et relatifs aux impacts de la pollution lumineuse ont été identifiés avec : 1) la SCO qui sensibilise sur les impacts de la pollution lumineuse sur les oiseaux marins, notamment depuis le lancement de « SOS PETRELS » en 2007, et 2) l'association Bwärä Tortues Marines qui sensibilise aux impacts de la pollution lumineuse sur les tortues marines qui fréquentent le site de nidification de la Roche Percée à Bourail.

Projet d'adaptation de l'arrêté métropolitain du 27 décembre 2018 relatif à la prévention, à la réduction et à la limitation des nuisances lumineuses : ce projet est porté par le cluster néo-calédonien Synergie qui regroupe 55 entreprises du domaine de l'énergie. L'arrêté métropolitain du 27/12/2018 permet de fixer un grand nombre de règles limitant ainsi le phénomène de pollution lumineuse. Cet arrêté ne s'appliquant pas en Nouvelle-Calédonie, Synergie porte une proposition d'adaptation de l'arrêté métropolitain auprès du Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie.

6. Discussion et synthèse

Caractérisation de la pollution lumineuse en Nouvelle-Calédonie

A ce jour, la pollution lumineuse reste peu caractérisée en Nouvelle-Calédonie. Seuls quelques travaux menés à l'échelle internationale permettent de bénéficier d'informations sur le phénomène. En 2016, l'atlas de la luminosité nocturne de FALCHI *et al.* (2016) faisait apparaitre qu'en 2014 92,4% de la population de Nouvelle-Calédonie vivait sous un ciel nocturne perturbé par la pollution lumineuse avec des niveaux élevés de pollution lumineuse pour 48,4% de la population. Les travaux de AUBRECHT *et al.* (2010) concernant l'exposition des aires protégées à la lumière artificielle annonçait qu'en 2003, 6,5% des aires protégées du territoire étaient exposées à la lumière artificielle.

Des informations relatives à la luminance nocturne observées sur le territoire sont également consultables mais sans modélisation de la diffusion de la lumière artificielle qui constitue une approche plus pertinente pour appréhender les perturbations potentielles.

Ces approches mondiales permettent d'obtenir des premières informations sur le phénomène et d'effectuer des comparaisons entre régions, cependant, aucune calibration intégrant les spécificités du territoire (conditions atmosphériques…) n'ont été effectuées. Ces résultats doivent donc être interprétés avec précaution.

En parallèle de ces études, diverses sources d'informations pouvant permettre de caractériser le phénomène ont été identifiées avec :

- Les données d'éclairage détenus par différents acteurs du territoire et qui nécessiteraient un important travail de collecte et consolidation pour pouvoir être exploitées à l'échelle de l'archipel.
- Les données satellitaires des programmes internationaux dont une partie est gratuite.
- Les mesures qui peuvent être effectuées *in situ* à l'aide d'instruments dédiés.
- Les données de recensement de la population ou de mode d'occupation des sols.

Connaissances des impacts de la pollution lumineuse en Nouvelle-Calédonie

La collecte des informations réalisées montre que les impacts de la pollution lumineuse sur les oiseaux marins est bien réel avec 2324 échouages rapportés sur la période 2004-2022. La grande majorité des échouages concernent trois espèces d'oiseaux qui représentent 97,9% des individus échoués :

- le puffin fouquet (*Puffinus pacificus chlororhynchus*), espèce non menacée d'extinction selon l'UICN, à large répartition régionale, mais dont près du tiers de la population du Pacifique se trouverai en Nouvelle-Calédonie. Sur la période 2004-2022, 1910 individus ont été retrouvés échoués.
- le pétrel de Gould (*Pterodroma leucoptera caledonica)*, menacée d'extinction selon l'UICN (statut Vulnérable-VU) et représentant une sous-espèce considérée endémique. La plus grande partie de la population mondiale se trouve certainement en Nouvelle-Calédonie. Sur la période 2004-2022, 269 individus ont été retrouvés échoués.
- Le pétrel de Tahiti (*Pseudobulweria rostrata trouessarti*), il s'agit d'une sous espèce endémique à la Nouvelle-Calédonie considérée comme quasi-menacée d'extinction selon l'UICN (Statut quasi-menacé – NT). La Nouvelle-Calédonie abriterait 5 à 25% de la population mondiale de cette espèce. Sur la période 2004-2022, 96 individus ont été retrouvés échoués (SCO, PZF, PRNC/Vale NC, MARESCHAL J., 2009).

Les phénomènes d'échouages interviennent principalement en zone côtière et peuvent être très variables en fonction des années, allant de 416 échouages en 2022 à 18 échouages en 2007. Le nombre moyen d'échouages annuel est de 141 ET ± 101,6.
La saison la plus défavorable aux oiseaux semble être la période de reproduction avec un pic en fin de cycle, durant l'envol des jeunes. Les mois d'avril à juin sont ceux où les échouages sont les plus importants pour les puffins fouquet et les pétrels de Gould. Concernant les pétrels de Tahiti, il n'y a pas de saisonnalité marquée sur les échouages ce qui semble corroborer une reproduction qui intervient tout au long de l'année.
Selon les observations effectuées, la nébulosité atmosphérique liée aux conditions météo semble être un facteur important dans l'intensité du phénomène d'échouage. Plus la nébulosité serait élevée et plus le nombre d'échouage serait important.
Bien entendu, la collecte des données permettant le suivi de ce phénomène est intimement liée au niveau de sensibilisation des personnes impliquées. Nous ne disposons d'aucun élément concernant l'effort de communication consenti dans le temps, mais il serait intéressant de mettre cela en parallèle de résultats obtenus.

Concernant les autres impacts de la pollution lumineuse en Nouvelle-Calédonie, la perturbation potentielle des tortues marines lors de leur nidification et/ou de leurs émergences est rapportée, notamment sur le site de la Roche Percée bien que le site soit considéré comme non perturbé (MAGNAN M. E. *et al.* 2021).

Enfin, le rapportage des suivis de chiroptères réalisés au niveau de certains sites miniers révèle une modification du comportement alimentaire de deux espèces de chauve-souris qui viennent chasser les insectes attirés autour des éclairages. Il s'agit des espèces :

- *Miniopterus australis,* espèce protégée dont le statut UICN la classe comme non-menacée d'extinction, toutefois l'association Endemia la considère comme vulnérable considérant le peu de gites adaptés à l'espèce qui est cavernicole.
- *Miniopterus macrocneme*, également une espèce protégée. Considérant le faible niveau de connaissance sur l'espèce qui est rare en Nouvelle-Calédonie, l'association Endemia la considère comme vulnérable.

Au niveau international, la synthèse des effets de la lumière artificielle nocturne sur la biodiversité laisse bien entrevoir d'importantes lacunes dans les connaissances locales compte tenu du panorama étendu des perturbations engendrées, avec une grande diversité de taxons faunistique et floristique dans une gamme de milieux naturels variés, et à des niveaux d'organisation biologiques allant de l'individus jusqu'à l'écosystème.
Dans le contexte calédonien, certains impacts rapportés au niveau international interpellent avec les perturbations relevées au niveau :

- du corail qui joue un rôle primordial dans les écosystèmes marins de Nouvelle-Calédonie ;
- des poissons récifaux, qui représentent notamment une importante ressource vivrière ;
- des chauves-souris frugivores, qui ont un rôle déterminant dans le maintien des forêts via la pollinisation et la dispersion des graines ;
- des plantes, avec un taux d'endémisme proche des 80% sur le territoire et près de 20% des espèces évaluées comme menacées d'extinction par l'UICN (source Endemia) ;

- des insectes qui jouent un rôle déterminant dans les écosystèmes terrestres avec notamment une fonction clé dans la pollinisation et une place importante dans la chaine trophique. Les insectes de Nouvelle-Calédonie rassemblent de nombreuses espèces endémiques ;
- des mollusques terrestres avec notamment l'existence de 17 taxons de bulimes et une part d'endémisme importante sur ce taxon ;
- des lézards, dont les geckos qui sont principalement des espèces nocturnes avec un fort taux d'endémisme et plusieurs espèces menacées d'extinction en Nouvelle-Calédonie ;
- A noter enfin l'existence d'un oiseau nocturne fréquent en Nouvelle-Calédonie, la chouette effraie, dont le maintien va être étroitement corrélé à la qualité de l'environnement nocturne.

Prise en considération de la pollution lumineuse en Nouvelle-Calédonie

Les informations collectées concernant la prise en considération du phénomène au niveau local montrent que celle-ci reste faible. De manière générale, la lumière artificielle est bien considérée comme un facteur de perturbation potentielle, en particulier pour les oiseaux marins et les tortues marines, mais il n'y a pas de stratégie particulière qui soit établie pour son atténuation et sa prévention.

Les textes concernant la transition énergétique de la Nouvelle-Calédonie inscrivent vraisemblablement la technologie LED comme le futur de l'éclairage public sans aucune mise en garde sur les intensités et spectre lumineux associés à ces équipements qui peuvent être un facteur d'aggravation des impacts environnementaux.

Les stratégies relatives à l'urbanisme ne semblent pas vraiment intégrer de contraintes sur l'emploi des éclairages. Une notion intéressante est toutefois rapportée sur la nécessité de préserver et restaurer la continuité écologique dans le code de l'urbanisme de Nouvelle-Calédonie. Seule la commune de Dumbéa disposerait d'un SDAL- Schéma Directeur d'Aménagement Lumière.

Les mesures locales qui semblent les plus structurantes sur la thématique correspondent :

- Aux règles imposées par le code de l'environnement de la province Sud sur l'utilisation des enseignes lumineuses et la publicité lumineuse. Des règles concernant les périodes d'extinction sont notamment imposées. A noter que nous n'avons pas de connaissance de la bonne mise en œuvre et de l'effort de contrôle de ces mesures.
- La prise en compte des recommandations de la SCO dans certains arrêtés relatifs à l'octroie d'autorisation (aménagement, ICPE…).
- Le projet porté par le cluster Synergie d'adaptation de faire adopter un format adapté de l'arrêté du 27 décembre 2018 pour limiter les nuisances lumineuses constituerai une grande avancée.

7. Conclusion

La présente étude a permis de recenser et synthétiser les informations existantes concernant les impacts environnementaux liés à la pollution lumineuse en Nouvelle-Calédonie et de les mettre en perspective des connaissances acquises au niveau international.

A ce jour, malgré des impacts flagrants sur certains pans de la biodiversité néo-calédonienne, la pollution lumineuse reste une pression environnementale mal connue et faisant l'objet de peu d'attention. Pourtant, avec une urbanisation croissante, l'augmentation quasi continue de la démographie ces 50 dernières années et l'émergence de la technologie LED moins énergivore, il est probable que le territoire va connaitre une intensification des émissions lumineuses.

Dans un contexte de changement climatique, la biodiversité unique de la Nouvelle-Calédonie fait déjà face à de multiples pressions avec les incendies, l'érosion des sols, l'exploitation minière et industrielle, les espèces envahissantes, l'urbanisation… Au même titre, la pollution lumineuse impliquant de nombreuses répercussions sur les organismes vivants et les écosystèmes doit faire l'objet de toute l'attention des acteurs de l'environnement.

8. Bibliographie

AUBRECHT C., JAITEH M., DE SHERBININ A. (2010). Global assessment of light pollution impact on protected areas.

AYALON I., BENICHOU J. I. C., AVISAR D., LEVY O. (2021). The Endosymbiotic Coral Algae Symbiodiniaceae Are Sensitive to a Sensory Pollutant: Artificial Light at Night, ALAN. Front. Physiol. 12:695083. doi: 10.3389/fphys.2021.695083.

AYALON I., DE BARROS MARANGONI L. F., BENICHOU J. I. C., AVISAR D., LEVY. O. (2019). Red Sea corals under Artificial Light Pollution at Night (ALAN) undergo oxidative stress and photosynthetic impairment.

AYALON I., ROSENBERG Y., BENICHOU J. I. C., KYBA bC. C. M., CABAITAN P. C., LEVY O. (2020). Coral Gametogenesis Collapse under Artificial Light Pollution.

BADMAN D. G. (1966) Effects of light on the orientation of the snail Physa pomillia in a weak magnetic field. Psychol Forsch 29:360–371.

BAKER B. J. (2006).- The effect of artificial light on male breeding-season behaviour in green frogs, Rana clamitans malanota. Canadian Journal of Zoology. : 1528-1532.

BARDONNET A., BOLLIET V., BELON V. (2005). Recruitment abundance estimation : Role of glass eel (Anguilla anguilla L.) response to light. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 321 : 181-190.

BECKER A., WHITFIELD A.K. , COWLEY P. D., JARNEGREN J., NAESJE T. F. (2013). Potential effects of artificial light associated with anthropogenic infrastructure on the abundance and foraging behaviour of estuary-associated fishes. Journal of Applied Ecology 50 (1): 43–50.

BEDROSIAN T. A., GALAN A., VaAUGHN C. A., WEIL Z. M., NELSON R. J. (2013). Light at night alters daily patterns of cortisol and clock proteins in female siberian hamsters. J. Endocrinol. 25, 590-596.

BEIER P. (2006). Effects of artificial night lighting on terrestrial mammals. Pp. 19-42 in Ecological consequences of artificial night lighting (C. RICH & T. LONGCORE, eds.). Island Press : Washington D.C., 458 pp.

BEIER P. (2006).- Effects of artificial night lighting on terrestrial mammals. Pp. 19-42 in Ecological consequences of artificial night lighting (C. RICH & T. LONGCORE, eds.). Island Press : Washington D.C., 458 pp.

BENNIE J., DAVIES T. W., CRUSE D., GASTON K. J. (2016). Ecological effects of artificial light at night on wild plants.

BENNIE J., DAVIES T. W., CRUSE D., INGER R., Gaston, K.J. (2015). Cascading effects of artificial light at night: resource-mediated control of herbivores in a grassland ecosystem. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, 370, 20140131.

BETZ J. T. (1961).- Eclairage public et faune des Hétérocères. Alexanor 2 : 51-54.

BIRD B.L., BRANCH L. C., MILLER D. L. (2004). Effects of coastal lighting on foraging behavior of beach mice. Conservation Biology 18 (5): 1435–1439.

BIRD B.L., BRANCH L.C., MILLER D.L. (2004). Effects of coastal lighting on foraging behaviour of Beach mice. Conservation Biology 18 (5) : 1435-1439.

BLAB J., RUCKSTUHL T., ESCHE T., HOLZBERGER R. & LUQUET G.Ch. (1988).- Sauvons les papillons. Les connaître pour mieux les protéger. 192 p., 398 illustr. Photgr. Coul. Editions Duculot, Gembloux (Belgique) et Paris (p. 140 : Papillons de nuit : holocaustes sous les réverbères).

BOHLKEN S., JOOSSE J. (1981) The effect of photoperiod on female reproductive activity and growth of the freshwater pulmonate snail Lymnaea stagnalis kept under laboratory breeding conditions.

International Journal of Invertebrate Reproduction 4:213–222.
https://doi.org/10.1080/01651269.1981.10553430.
BOLDOGH S., DOBROSI D., SAMU P. (2007). The effects of the illuminatings on house-dwelling bats and its conservation consequences. Acta Chiropterologica 9 : 527-534.
BOLTON D., MAYER-PINTO M., CLARK G. F., DAFFORN K. A., BRASSIL W. A. , BECKER A.,JOHNSTON E. L. (2017). Coastal urban lighting has ecological consequences for multiple trophic levels under the sea. Science of the Total Environment 576: 1–9.
BOURGEOIS K., DROMZÉE S., PAGENAUD A., CHAGNEAU G., LE CORRE M., VIDAL E. (2019). Étude de faisabilité du déplacement de colonies de pétrels sur massifs miniers : rapport scientifique final.
BOYES D. H., EVAN D. M., FOX R., PARSONS M. S., POCOCK. M. J. O. (2020). Is light pollution driving moth population declines? A review of causal mechanisms across the life cycle.
BRESCIA F. (2007). Inventaire de la mégachiroptérofaune du Massif du Koniambo et recommandations de mesures de protection. Rapport d'étude IAC/ Programme Elevage et Faune Sauvage n°6/2007. Convention de collaboration IAC/KNS n°3190000-00000-CN-C208-001. 37p
BRIGGS W. R. (2006). Physiology of plant responses to artificial lighting. Ecological Consequences of Artificial Night Lighting (eds C. Rich & T. Longcore), pp. 389–412. Island Press, Washington, DC, USA.
BRUDERER B., PETER D., STEURI T. (1999). Behaviour of migrating birds exposed to X-band radar and a bright light beam. Journal of Experimental Biology 2002 : 1015-1022.
BRÜNING A., HOLKER F., FRANKE S., KLEINER W., KLOAS W. (2016). Impact of different colours of artificial light at night on melatonin rhythm and gene expression of gonadotropins in European perch. Sci. Total Environ. 543, 214-222.
BRUSSEAUX G. (1991).- Eclairages publics et protection des Lépidoptères nocturnes. Alexanor 17 :195-197.
BUCHANAN B.W. (1993).- Effects of enhanced lighting on the behaviour of nocturnal frogs. Anim. Behav. 45 : 893-899.
CATHEY A. R., CAMPBELL L. E. (1975a). Effectiveness of five vision-lighting sources on photo-regulation of 22 species of ornamental plants. Journal of the American Society for Horticultural Science, 100, 65–71.
CATHEY A. R., CAMPBELL L. E. (1975b) Security lighting and its impact on the landscape. Journal of Aboriculture, 1, 181–187.
CHALLEAT S. (2007). Cartographie de la pollution lumineuse zénithale en Bourgogne à partir de données de population et d'occupation du sol.
CINZANO P., FALCHI F., ELVIDGE C. D. (2001). The first World Atlas of the artificial night sky brightness.
CLAMPITT P. T. (1974). Seasonal migratory cycle and related movements of the fresh-water pulmonate snail, Physa integra. American Midland Naturalist:275–300.
CLARO F., BARDONNET C. (2011). Les tortues marines et la pollution lumineuse sur le territoire français.
DAVIES T.W., BENNIE J., GASTON K. J.(2012). Street lighting changes the composition of invertebrate communities. Biology Letters 8 (5): 764–767.
DE JONG M., JENINGA L., OUYANG J. Q., VAN OERS K., SPOELSTRA K., VISSER M. E. (2016). Dose-dependent responses of avian daily rhythms to artificial light at night. Physiol. Behav. 155, 172-179.
DEBAR L., RAHMOUN S. (2019). Suivi des populations de chiroptères du site minier SLN de Thio Plateau 2e session de suivi : S2.
DELELIS N., CHARTENDRAULT V., BARRÉ N. (2007). Oiseaux menacés du massif de Koniambo. État des populations, recommandations d'atténuation et de compensations. Rapport final IAC & SCO pour KNS, non publié, 109 p.

Department of the Environment and Energy of Australia (2020). National Light Pollution Guidelines for Wildlife Including Marine Turtles, Seabirds and Migratory Shorebirds, Commonwealth of Australia 2020.

DEVECHERE P., VAUCLAIR S. (2019). Modélisation de la pollution lumineuse à partir de données de radiance satellite.

DOGTEROM G. E., BOHLKEN S., GERAERTS W. P. M. (1983) A rapid in vivo bioassay of the ovulation hormone of Lymnaea Stagnalis. Gen Comp Endocrinol 50:476–482. https://doi.org/10.1016/0016-6480(83) 90269-1.

DOMINONI D., GOYMANN W., HELM B., PETECKE J. (2013b). Urban-like night illumination reduces melatonin release in European blackbirds (Turdus merula): implications of city life for biological time-keeping of songbirds. Front. Zool. 10, 1-11.

DOMINONI D., QUETTING M., PARTECKE J. (2013a). Artificial light at night advances avian reproductive physiology. Proc. Biol. Sci. 280, 20123017.

DOMINONI D., QUETTING M., PARTECKE J. (2013c). Long-term effects of chronic light pollution on seasonal functions of European blackbirds (Turdus merula). PLoS ONE 8, e85069.

DWYER R.G., BEARHOP S., CAMPBELL H. A., BRYANT D. M. (2013). Shedding light on light: Benefits of anthropogenic illumination to a nocturnally foraging shorebird. Journal of Animal Ecology 82 (2): 478–485.

FALCHI F., CINZANO P., DURISCOE D., KYBA C. C. M., ELVIDGE C. D., BAUGH K., PORTNOV B. A., RYBNIKOVA N. A., FURGONI R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brigthness.

FUTSAETHER C.M., VOLLSNES A.V., KRUSE O.M.O., OTTERHOLT E., KVAAL K., ERIKSEN A.B. (2009). Effects of the nordic photoperiod on ozone sensitivity and repair in different clover species studied using infrared imaging. Ambio, 38, 437–443.

GAL G., LOEW E. R., RUDSTAM L. G.,MOHAMMADIAN A.M. (1999). Light and diel vertical migration: Spectral sensitivity and light avoidance by Mysis relicta. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 56 (2): 311–322.

GLIWICZ Z.M. (1986).- A lunar cycle in zooplankton. Ecology 67 : 883-897.

GRENIS K., MURPHY S. M. (2019). Direct and indirect effects of light pollution on the performance of an herbivorous insect. Insect Sci. 26, 770–776 (2019).

GRIBISIC M., SINGER G., BRUNO M. C., VAN GRUNSVEN R. H. A., MANFRIN A.,MONAGHAN M. T., HOLKER F. (2017). Artificial light at night decreases biomass and alters community composition of benthic primary producers in a sub-alpine stream. Limnology and Oceanography 62 (6): 2799–2810.

HEILING A. (1999). Why do nocturnal orb-web spiders (Araneidae) search for light?. Behav Ecol Sociobiol 46, 43–49 (1999).

HEMMINGA M. A., MAASKANT J. J., JAGER J. C., JOOSSE J. (1985). Glycogen metabolism in isolated glycogen cells of the freshwater snail Lymnaea stagnalis. Comp Biochem Physiol A Physiol 82:239–246. https:// doi.org/10.1016/0300-9629(85)90733-9.

HENN M., NICHOLS H., ZHANG Y. X., BONNER T. H. (2014). Effect of artificial light on the drift of aquatic insects in urban central Texas streams. Journal of Freshwater Ecology 29 (3): 307–318.

HOLSBEEK L. (Convenor) (2008).- International Working Group on Light Pollution – Draft assessment of critical points. 13th Meeting of the Advisory Committee. Cluj, Romania, 23-24 August 2008.

HOLZHAUER S. I. J., FRANKE S., KYBA C. C. M., MANFRIN A., KLENKE R., VOIGT C.C., LEWANZIK D., OEHLERT M., MONAGHAN M.T., SCHNEIDER S., HELLERS., KUECHLY H., BRUNING A., HONNEN A. C., HOLKER F. (2015). Out of the dark: Establishing a large-scale field experiment to assess the effects of artificial light at night on species and food webs. Sustainability 7 (11): 15593–15616.

HOMMAY G., KIENLEN J. C., GERTZ C., HILL A. (2001) Growth and reproduction of the slug Limax valentianus Firussac in experimental conditions. J Molluscan Stud 67:191–207.

IKENO T., WEIL Z. M., NELSON R. J. (2014). Dim light at night disrupts the shortday response in Siberian hamsters. Gen. Comp. Endocrinol. 197, 56-64.

IRD (2013). Recherches sur l'impact écologique de deux perturbations d'origine anthropique (espèces invasives et éclairage de site) sur les populations de pétrels et de puffins de sites miniers. Complément : Préconisations générales d'atténuation de l'impact des deux perturbations d'origine anthropique sur les sites SLN de Kopéto et Tiébaghi.

IRD (2013). Recherches sur l'impact écologique de deux perturbations d'origine anthropique (espèces invasives et éclairage de site) sur les populations de pétrels et de puffins de sites miniers. Rapport intermédiaire.

IRD (2015). Mise en oeuvre de prospections légères et rapides des populations de Pétrels au niveau de massifs de la SLN par récolte et analyse des fèces de chats harets et recherche de la présence de restes de pétrels prédatés. Compte-rendu de mission pour les sites de Poum, Opoué, Thio Plateau.

IRD (2015). Poursuite des travaux de recherche engagés sur (i) l'écologie et l'impact des populations de chats harets et (ii) la connaissance et la conservation des colonies de Pétrels en massifs miniers. Compte-rendu intermédiaire.

IRD (2015). Recherches sur l'impact écologique de deux perturbations d'origine anthropique (espèces invasives et éclairages de site) sur les populations de pétrels et de puffins de sites miniers. Complément : Recherche sur l'atténuation expérimentale de l'impact de deux perturbations d'origine anthropique sur les sites SLN de Kopéto et Tiébaghi. Rapport final.

IRD (2016). Poursuite des travaux de recherche engagés sur (i) l'écologie et l'impact des populations de chats harets et (ii) la connaissance et la conservation des colonies de Pétrels en massifs miniers. Rapport final - 1ère version.

IRD (2016). Suivi des populations de Pétrels de Tahiti Pseudobulweria rostrata du massif de Tiébaghi, site de la Société LE NICKEL SLN.

JAEGER R.G. & HAILMAN J.P. (1973).- Effects of intensity on the of the phototactic responses of adult anuran amphibians : a comparative survey : Z. Tierpsychol. 33 : 352-407.

JUNG K., KALKO E. K. V. (2010). Where forest meets urbanization: Foraging plasticity of aerial insectivorous bats in an anthropogenically altered environment. Journal of Mammalogy 91 (1): 144–153.

KELBER J.S., WARRANT E., SWEENEY A.M., WIDDER E.A., LEE R.L., HERNANDEZANDRES J. (2006). Crepuscular and nocturnal illumination and its effects on colour perception by the nocturnal hawkmoth Deilephila elpenor. J. Exp. Biol. 209 : 789-800.

KOBLER R. (2002). Die Lichtverschmutzung in der Schweiz. Mögliche Auswirkungen und praktische Lösungsansätze. Diplomarbeit, Institut für Umwelttechnik, Fachhochschule Basel.

KOLLIGS D. (2000).- [Conséquences écologiques des sources artificielles de lumière sur les insectes noctunres, en particulier les papillons (Lepidoptera)]. (en allemand) Faunistisch-Ökologische Mitteilungen Suppl 28 : 1-136.

KOTTLER B.P. (1984). Risk of predation and the structure of desert community. Ecology 65 : 689-701.

KUIJPER D. P. J., SCHUT J., VAN DULLEMEN D., TOORMAN H., GOOSSENS N., OUWEHAND J., LIMPENS H. J. G. A. (2008). Experimental evidence of light disturbance along the commuting routes of pond bats (Myotis dasycneme). Lutra 51: 37–49.

KUMAR N., SINGH D. K., SINGH V. K. (2016). Chlorophyllin bait formulation and exposure to different spectrum of visible light on the reproduction of infected/uninfected snail Lymnaea acuminata Scientifica 2016.

LARINIER M., BOYER-BERNARD S. (1991). Downstream migration of smolts and effectiveness of a fish bypass structure at halsou hydroelectric powerhouse on the nive river. Bulletin Français de la Peche et de la Pisciculture, 321:72–92.

LE CORRE M., OLLIVER A., RIBES S., JOUVENTIN P. (2002). Light-induced mortality of petrels : a 4-year study from Réunion Island (Indian Ocean). Biological Conservation 105 : 93-102.

LEINER K. A., MACKENZIE D. S. (2001). The effects of photoperiod on growth rate and circulating thyroid hormone levels in the red drum, Sciaenops ocellatus: evidence for a free-running circadian rhythm of T4 secretion. Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol. 130, 141-149.

LETALLEC T., THERY M., PERRET M. (2015). Effects of light pollution on seasonal estrus and daily rhythms in a nocturnal primate. J. Mammal. 96, 438-445.

LEWANZIK D., VOIGT C.C. (2014). Artificial light puts ecosystem services of frugivorous bats at risk. Journal of Applied Ecology 51 (2): 388–394.

LHONORE J.E. (1987).- De l'incidence des éclairages urbains sur les populations de Lépidoptères in RICOU.

LLOYD J. E. (2002).- Stray light, fireflies, and fireflyers. Part of the conference Ecological Consequences of Artificial Night Lighting. Abstract available online : http://www.urbanwildlands.org/abstracts.html.

LONGCORE T. & RICH C. (2004). Ecological light pollution. Frontiers in Ecology and the Environnment 2 : 191-198.

LONGCORE T. & RICH C. (2004).- Ecological light pollution. Frontiers in Ecology and the Environnment 2 : 191-198.

MAGNAN M. E., READ T. C., FARMAN R. (2021).A New Method to Assess the Light Pollution on Loggerhead Hatchlings from La Roche Percée Rookery, New Caledonia.

MANFRIN A., SINGER G., LARSEN S., WEIß N. , VAN GRUNSVEN R. H. A., WEIß N. S., WOHLFAHRT S., MONAGHAN M. T. , HOLKER F. (2017). Artificial light at night affects organism flux across ecosystem boundaries and drives community structure in the recipient ecosystem. Frontiers in Environmental Science 5(61): 1–14.

MARESCHAL J. (2009). Impact des pollutions lumineuses sur les procellariidés de Nouvelle-Calédonie.

MARTIN B., PEREZ H., FERRER M. (2018). Effects of natural and artificial light on the nocturnal behaviour of the wall gecko.

MARTINS R. S., ALVAREZ PEREZ J. A. (2006). Cephalopods and Fish Attracted by Night Lights in Coastal Shallow-waters, off Southern Brazil, with the Description of Squid and Fish Behavior.

MATJKE E. B. (1936). The effect of street lights in delaying leaf-fall in certain trees. American Journal of Botany, 23, 446–452.

MEYER L. A., SULLIVAN S. M. P. (2013). Bright lights, big city: Influences of ecological light pollution on reciprocal stream-riparian invertebrate fluxes. Ecological Applications 23 (6): 1322–1330.

MIGAUD H., COWAN M., TAYLOR J., FERGUSON H. W. (2007). The effect of spectral composition and light intensity on melatonin, stress and retinal damage in post-smolt Atlantic salmon, Salmo salar. Aquaculture 270, 390-404.

MILLION L., BRESCIA F. (2016). Les chauves-souris insectivores de la Nouvelle-Calédonie. État de l'art et comparaison avec les espèces du Pacifique.

MOLENAAR DE J.G., JONKERS D.A., SANDERS M.E. (2000). Road illumination and nature. III. Local influence of road lights on a Black-tailed Godwit (Limosa l. limosa) population. Wageningen, The Nertherlands : Alterra.

MOORE M.V, PIERCE S.M. & WALSH H.M. (2000).Urban light pollution alters the diel vertical migration of Daphnia. Verh. International Verien Limnology 27 : 779-782.

MU H., Li X., DU X., HUANG J., SU W., HU T., WEN Y., YIN P., HAN Y., XUE F. (2021). Evaluation of Light Pollution in Global Protected Areas from 1992 to 2018.

MUSTERS C.J.M., SNELDER D.J., VOS P. (2009) The effects of coloured light on nature. Institute of Environmental Sciences, Leiden University, Department of Conservation Biology. 43 p.

NAVARRO-BARRANCO, C., HUGHES L. E. (2015). Effects of light pollution on the emergent fauna of shallow marine ecosystems:Amphipods as a case study. Marine Pollution Bulletin 94 (1-2): 235–240.

NEMETH R. S., ANDERSON J. J. (1992). Response of juvenile coho and chinook salmon to strobe and mercury vapor lights. North American Journal of Fisheries Management, 12(4):684–692.

NICHOLAS M. (2001). Light Pollution and Marine Turtle Hatchlings : The Straw that Breaks the Camel's Back ? Protecting Dark Skies 18 (4) : 77-82.

OBRTEL B., HOLISOVA V. (1981). The Diet of Hedgehogs in an Urban Environment. Folia Zool.30 (3) : 193-201. qui montre comment l'éclairage urbain change le régime alimentaire des hérissons (par changement de la composition de la faune urbaine des arthropodes).

OLIVEIRA C., ORTEGA A., LOPEZ-OLMEDA J. F., VERA L. M, SaANCHEZ-VAZQUEZ F. J. (2007). Influence of constant light and darkness, light intensity, and light spectrum on plasma melatonin rhythms in senegal sole. Chronobiol. Int. 24, 615-627.

OUYANG J. Q., DE JONG M., HAU M., VISSER M. E., VAN GRUNSVEN R. H. A., SPOELSTRA K. (2015). Stressful colours: corticosterone concentrations in a freeliving songbird vary with the spectral composition of experimental illumination. Biol. Lett. 11, 20150517.

PAGENAUD A., BOURGEOIS K., DROMZÉE S., THIBAULT M., CHAGNEAU G., BARRÉ N., BOUYÉ E., CHARTENDRAULT V., DELELIS N., DIJOUX J., PATROIS M., SPAGGIARI J., VIDAL E. (2021). Tahiti Petrel *Pseudobulweria rostrata* population decline at a nickel-mining site: a critical need for adapted conservation strategies.

PANTZ J. (2011). Pollution lumineuse sur le site de Thiébaghi. Impacts, quantification et préconisations.

PEREA J., GARCIA A., GOMEZ G., ACERO R., PENA F., GOMEZ S. (2007). Effect of light and substratum structural complexity on microhabitat selection by the snail Helix aspersa Müller. J Molluscan Stud 73:39–43.

PERKIN E. K.,HOLKER F., TOCKNER K, RIDCHARDSON J. S. (2014b). Artificial light as a disturbance to light-naive streams. Freshwater Biology 59 (11): 2235–2244.

PERKIN E. K.,HOLKER F., TOCKNER K. (2014a). The effects of artificial lighting on adult aquatic and terrestrial insects. Freshwater Biology 59 (2): 368–377.

PIERCE S.M. & MOORE M.V. (1998). Light pollution affects the diel vertical migration of freshwater zooplankton. Annual Meeting of the Ecological Society of America, Baltimore, MD.

PULGAR J., ZEBALLOS D., VARGAS J., ALDANA M., MANRIQUEZ P., MANRIQUEZ K., QUIJON P. A., WIDDICOMBE S., ANGUITA C., QUINTANILLA D., DUARTE C. (2019).Endogenous cylcles, activity patterns and energy expenditure of an intertidal fish is modified by artificial light pollution at night (ALAN).

RAMIREZ R., JOHNSON E.R., GIDO K.B. (2006). Effects of artificial lighting and presence of Menidia beryllina on growth and diet of Lamesthes sicculus. Southwestern naturalist 51 (4) : 510-513.

ROBERT K. A., LESKU J. A., PARTECKE J., ChAMBERS B. (2015). Artificial light at night desynchronizes strictly seasonal reproduction in a wild mammal. Proc. R. Soc. B Biol. Sci. 282, 20151745.

ROBERTSON B., KRISKA G., HORVATH V., HORVATH G. (2010). Glass buildings as bird feeders: Urban birds exploit insects trapped by polarized light pollution. Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae 56: 283–293.

ROSENBERG Y., DONIGER T., LEVY O. (2019). Sustainability of coral reefs are affected by ecological light pollution in the Gulf of Aqaba/Eilat.

RYDELL J. (1992). Exploitation of insects around streetlamps by bats in Sweden. Functional Ecology 6 (6): 744–750.

SALMON M. (2003). Artificial night lighting and sea turtles. Biologist 50 : 163-168.

SANCHEZ DE MIGUEL A., ZAMORANO J., AUBE M., BENNIE J., GALLEGO J., OCANA F., PETTIT D. R., STEFANOV W. L., GASTON K. J. (2021). Colour remote sensing of the impact of artificial light at night (II): Calibration of DSLR-based images from the International Space Station.

SANTOS C.D., MIRANDA A. C., GRANADEIRO J. P., LOURENCO P. M., SARAIVA S., PALMEIRIM J. M. (2010). Effects of artificial illumination on the nocturnal foraging of waders. Acta Oecologica-International Journal of Ecology 36 (2): 166–172.

SCHLIGLER J., CORTESE D., BELDADE R., SWEARER S. E., MILLS S. C. (2021). Long-term exposure to artificial light at night in the wild decreases survival and growth of a coral reef fish.

SCHOECH S. J., BOWMAN R., HAHN T. P., GOYMANN W., SCHWABL I., BRIDGE E. S. (2013). The effects of low levels of light at night upon the endocrine physiology of western scrub-jays (Aphelocoma californica). J. Exp. Zool. A Ecol. Genet. Physiol. 319, 527-538.

SCHROEDER C. A. (1945). Tree foliation affected by street lights. Arborists News, 10, 1–3.

SINNADURAI S. (1981) High pressure sodium lights affect crops in Ghana. World Crops, 33, 120–122.

SOKOLOVE P. G., MCCRONE E. J. (1978) Reproductive maturation in the slug, Limax maximus, and the effects of artificial photoperiod. J Comp Physiol 125:317–325.

SOLANO LAMPHAR H. A. (2018). The emission function of ground-based light sources: state of the art and research challenges.

SORDELLO R. (2017). Pollution lumineuse : longueurs d'ondes impactantes pour la biodiversité. Exploitation de la synthèse bibliographique de Musters et al. (2009). UMS 2006 Patrimoine naturel AFB-CNRS-MNHN. Rapport Patrinat n°2017-117. 18 p.

SULLIVAN S. M. P., HOSSLER K., MEYER L. A. (2018). Artificial lighting at night alters aquatic-riparian invertebrate food webs. Ecological Applications.

TELFER T. C., SINCOCK J.L., BYRD G.V., REED J.R. (1987). Attraction of Hawaiian seabirds to lights: conservation efforts and effect of moon phase. Wildl. Soc. Bull. 15: 406-413.

TER MAAT A., ZONNEVELD C., DE VISSER J. A. G., JANSEN R. F., MONTAGNE-WAJER K., KOENE J. M. (2007) Food intake, growth, and reproduction as affected by day length and food availability in the pond snail Lymnaea stagnalis. Am Malacol Bull 23:113–120.

TER MATT A., PIENEMAN A. W., KOENE J. M. (2012). The effect of light on induced egg laying in the simultaneous hermaphrodite Lymnaea stagnalis. J Molluscan Stud 78:262–267.

TEYSSÈDRE, A. (1996). L'orientation des animaux – Méthodes et mécanismes. Nathan : 234 p.

TEYSSÈDRE, A. (1996). L'orientation des animaux – Méthodes et mécanismes. Nathan : 234 p.

THOMAS J.R., JAMES J., NEWMAN R. C., RILEY W. D., GRIFFITHS S .W., CABLE J. (2016). The impact of streetlights on an aquatic invasive species: Artificial light at night alters signal crayfish behaviour. Applied
Animal Behaviour Science 176: 143–149.

UDAKA H., GOTO S. G., NUMATA H. (2008). Effects of photoperiod and acclimation temperature on heat and cold tolerance in the terrestrial slug, Lehmannia valentiana (Pulmonata: Limacidae). Appl Entomol Zool 43:547–551.

VALE NC (2010). Bilan de l'impact de la pollution lumineuse sur le site de VALE Nouvelle-Calédonie 2007-2010.

VALE NC (2012). Bilan des impacts dus aux pollutions lumineuses sur le site de VALE Nouvelle-Calédonie 2011-2012.

VALE NC (2016). Bilan Faune Terrestre 2015. Une synthèse des actions, des études et des suivis menés sur la faune terrestre en 2015.

VALE NC (2018). Bilan Faune Terrestre 2017. Une synthèse des actions, des études et des suivis menés sur la faune terrestre en 2017.

VALE NC (2019). Bilan Faune Terrestre 2018. Une synthèse des actions, des études et des suivis menés sur la faune terrestre en 2018.

VALE NC (2021). Rapport annuel 2020 concernant l'activité minière Incidence des activités minières sur l'occupation des sols, l'environnement et les eaux superficielles et souterraines.

VAN DUIVENBODEN Y. A. (1982) Non-ocular photoreceptors and photoorientation in the pond snailLymnaea stagnalis (L.). J Comp Physiol 149:363–368.

VERHEIJEN F. J. (1985). Photopollution : artificial light optic spatial control system fail to cope with. Incidents, causations, remedies. Exp. Biol. 44 : 1-18.

VOIGT C.C., AZAM C., DEKKER J., FERGUSON J., FRITZE M., GAZARYAN S., HOLKER F., JONES G., LEADER N., LEWANSIK D., LIMPENS H.J.G.A., MATHEWS F., RYDELL J., SCHOFIELD H., SPOELSTRA K., ZAGMAJSTER M. (2018): Guidelines for consideration of bats in lighting projects. EUROBATS Publication Series No. 8. UNEP/EUROBATS Secretariat, Bonn, Germany, 62 pp.

WALKER M. F. (1977).The effects of urban lighting on the brightness of the night sky. Astronomical Society of the Pacific, Publications, vol. 89, June-July 1977, p. 405-409.

WAYNE N. L., BLOCK G. D. (1992) Effects of photoperiod and temperature on egg-laying behavior in a marine mollusk, Aplysia californica. Biol Bull 182:8–14.

WIDDER E.A., ROBISON, B.H., REISENBICHLER K.R., HADDOCK, S.H.S. (2005). Using red light for in situ observations of deep-sea fishes.

WILLMOTT N. J., HENNEKEN J., SELLECK C. J., JONES T. M. (2018). Artificial light at night alters life history in a nocturnal orb-web spider.

WITHERINGTON B.E., MARTIN R.E (2000). Understanding, Assessing, and Resolving Light- Pollution Problems on Sea Turtle Nesting Beaches. Second Edition revised. Florida Marine Research Technical Report TR-2., 73 p.

YURK H., TRITES A.W. (2000). Experimental attemps to reduce predation by Harbour seals on out-migrating juvenile salmonids. Trans. Am. Fish. Soc. 129 : 1360-1366.

YURK H., TRITES A.W. (2000). Experimental attemps to reduce predation by Harbour seals on out-migrating juvenile salmonids. Trans. Am. Fish. Soc. 129 : 1360-1366.

ZAPATA M. J., MAZEIKA S., SULLIVAN P., GRAY S. M. (2018). Artificial Lighting at Night in Estuaries—Implications from Individuals to Ecosystems.

ZOZAYA S. M., ALFORD R. A., SCHWARZKOPF L. (2015). Invasive house geckos are more willing to use artificial lights than are native geckos.