

V. bêta

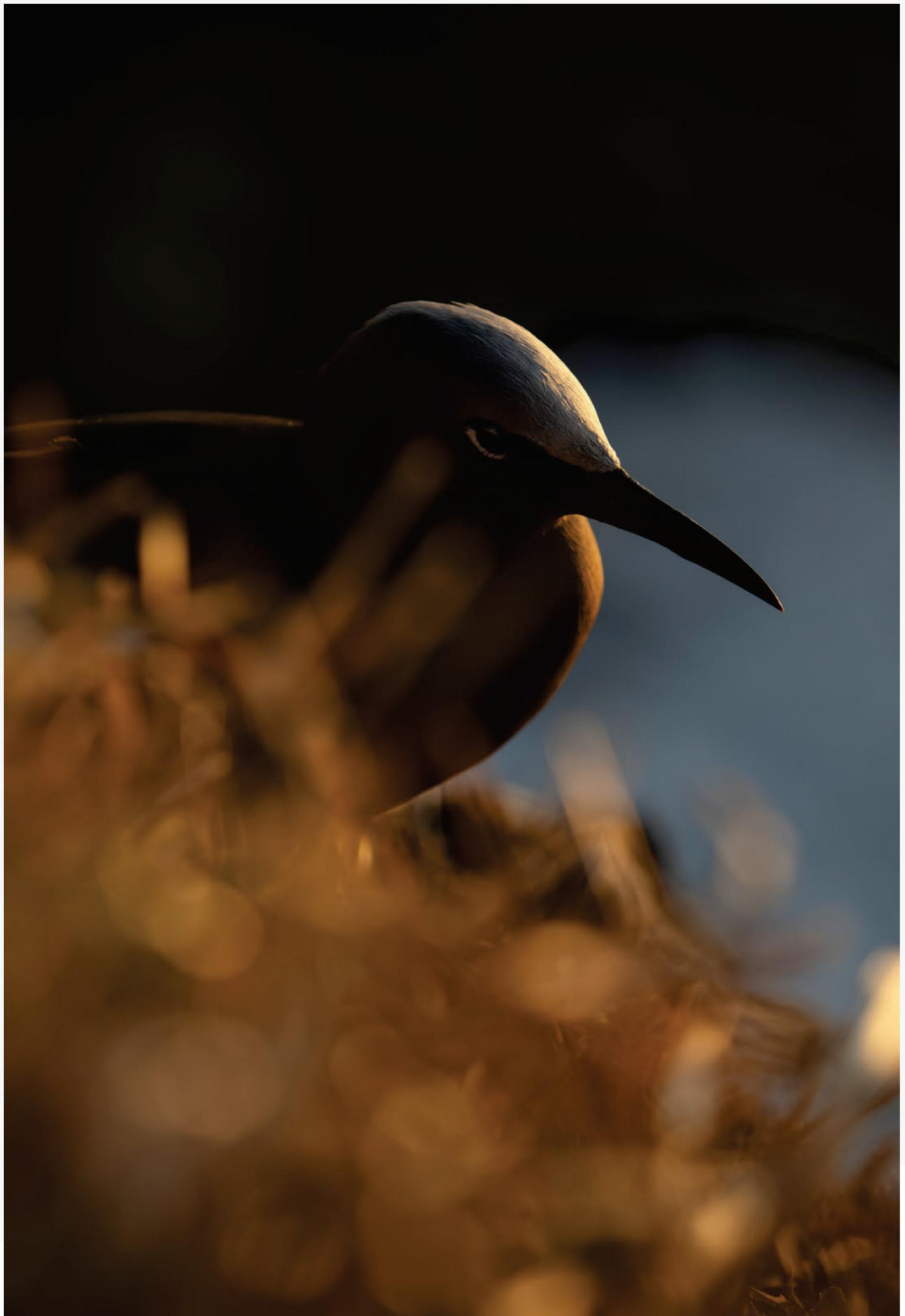
Observatoire de l'environnement nocturne du CNRS

Pollution lumineuse & environnement nocturne

Les productions scientifiques marquantes en 2023

SYNTÈSE
BIBLIOGRAPHIQUE
RÉALISÉE DANS LE
CADRE DU DÉFI
CLÉ OCCITANIE
BIODIVOC





Photographie : Samuel Challeat

ÉQUIPE DE RÉDACTION

Hélène Foglar*
David Loose*
Kévin Barré
Léa Mariton
Johan Milian
Samuel Challéat**

ÉQUIPE DU DÉFI CLÉ OCCITANIE BIODIVOC

Philippe Jarne
Gaëlle Mathieu-Ernande
Hanna Emlein
Tatiana Simic

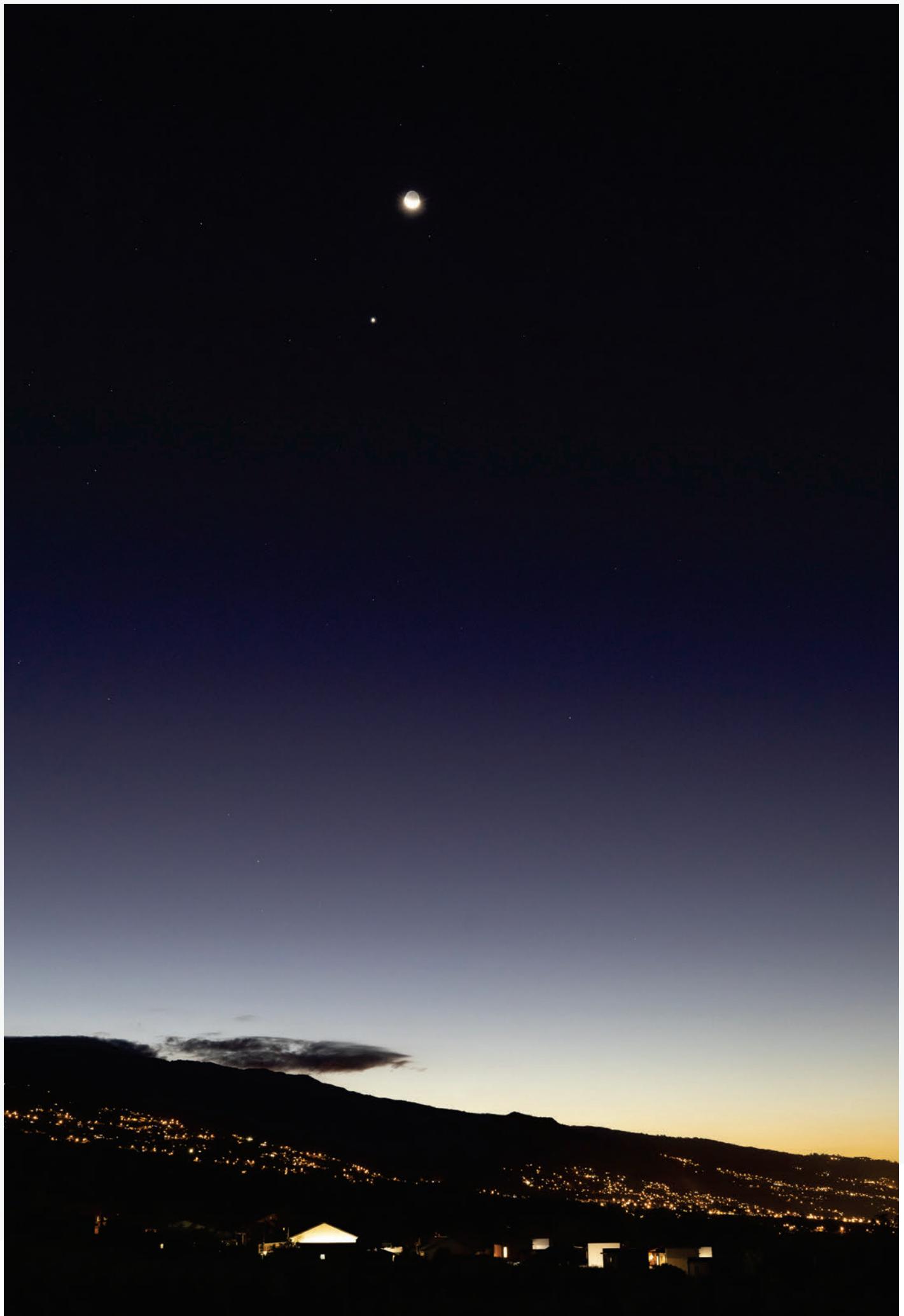
RÉALISATION

Conception graphique :
Samuel Challéat

Photographies :
David Loose
Samuel Challéat

* Hélène Foglar et David Loose partagent la position de premiers auteurs de ce rapport bibliographique.

** Samuel Challéat a coordonné ce travail au sein de l'Observatoire de l'environnement nocturne du CNRS, en lien avec l'équipe du défi clé BiodivOc.

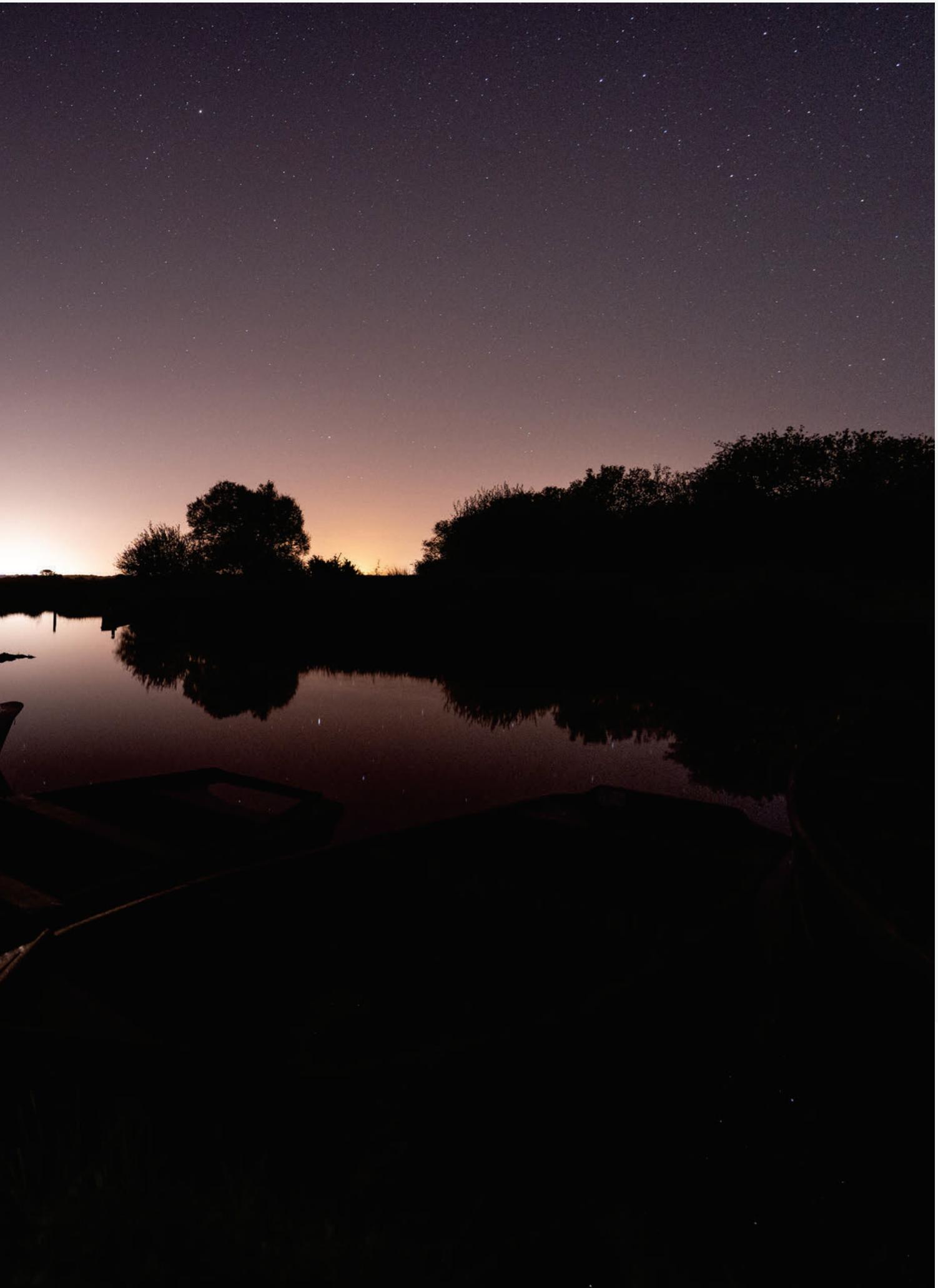


Photographie : Samuel Challeat

S O M M A I R E

- 09 UNE SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE ? POUR QUI, ET POUR QUOI FAIRE ?**
PAR SAMUEL CHALLÉAT, COORDINATEUR DE L'OBSERVATOIRE
DE L'ENVIRONNEMENT NOCTURNE DU CNRS
- 15 ARTICLES APPROCHE GLOBALE DE LA POLLUTION LUMINEUSE**
- 21 LES CONTRIBUTIONS MARQUANTES DANS LE CHAMP DE L'ASTRONOMIE**
- 23 LES CONTRIBUTIONS MARQUANTES DANS LES CHAMPS
DE LA MÉTROLOGIE ET DE LA MODÉLISATION**
- 29 LES CONTRIBUTIONS MARQUANTES DANS
LE CHAMP DES SCIENCES DU VIVANT**
- 53 LES CONTRIBUTIONS MARQUANTES DANS LES CHAMPS DES
SCIENCES DE LA SOCIÉTÉ ET DES SCIENCES DU TERRITOIRE**
- 63 LES THÈSES DE DOCTORAT**
- 67 LES RAPPORTS TECHNIQUES INSTITUTIONNELS**
- 75 L'OBSERVATOIRE DE L'ENVIRONNEMENT NOCTURNE DU CNRS**
- 79 LE DÉFI CLÉ OCCITANIE BIODIVOC**







Photographie : Samuel Challeat

UNE SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE ? POUR QUI, ET POUR QUOI FAIRE ?

SAMUEL CHALLÉAT, COORDINATEUR DE
L'OBSERVATOIRE DE L'ENVIRONNEMENT
NOCTURNE DU CNRS

L'ampleur des connaissances produites depuis deux décennies sur la lumière artificielle nocturne constitue à la fois une richesse scientifique considérable et un défi majeur pour celles et ceux qui doivent en traduire les implications dans l'action publique. Le phénomène est désormais identifié comme une pression environnementale transversale, qui affecte aussi bien les dynamiques des écosystèmes que les organisations socio-spatiales, les pratiques nocturnes, les politiques d'aménagement ou les imaginaires collectifs de la nuit. Mais cette reconnaissance élargie s'accompagne d'une difficulté croissante : celle d'ordonner des savoirs extrêmement dispersés dans les disciplines, de les mettre en perspective, et surtout de les rendre opératoires pour des acteurs territoriaux confrontés à des enjeux situés, à des arbitrages concrets et à des injonctions parfois contradictoires. Dans ce contexte, la nécessité d'une synthèse bibliographique interdisciplinaire n'est pas seulement académique : elle constitue un préalable indispensable à toute stratégie territoriale sérieuse en matière de gestion de la lumière nocturne.

La première raison de cette nécessité tient à la fragmentation et à l'asymétrie des connaissances disponibles. Les sciences de l'écologie, de la chronobiologie, de la physiologie, de la géographie, des sciences du territoire ou encore des STS (*Science & technology studies*) ont multiplié les enquêtes, les expérimentations et les analyses portant sur des dimensions souvent très spécifiques : comportements d'espèces sensibles, perturbations hormonales ou circadiennes, effets sur les ré-

seaux trophiques, régimes d'équipement urbain, normes d'éclairage, trajectoires sociotechniques des dispositifs lumineux, conflits d'usage, etc. Chaque champ disciplinaire propose ainsi un éclairage précieux sur un fragment du problème, mais ces éclairages ne se recouvrent que partiellement, et parfois se contredisent ou se juxtaposent sans réelle articulation. Le corpus scientifique est à la fois foisonnant et inégal : certaines thématiques ont fait l'objet d'investigations nombreuses et robustes, quand d'autres sont encore émergentes, lacunaires ou méthodologiquement fragiles. Les études se déploient sur des échelles variées, souvent difficilement compatibles entre elles : expériences en laboratoire, observations de terrain ponctuelles, suivis de long terme, analyses paysagères, modèles de dispersion lumineuse ou mesures photométriques. La conséquence, pour un acteur territorial, est une impression de saturation d'informations difficilement hiérarchisables : non que la connaissance manque, mais qu'elle peine à offrir un tableau cohérent de ses certitudes, de ses zones d'ombre et de ses marges de validité. Une synthèse bibliographique rigoureuse permet précisément de recomposer ce paysage hétérogène, d'identifier ce qui est bien établi, ce qui demeure incertain, ce qui est discuté, et dans quelles conditions méthodologiques ou écologiques les résultats peuvent être transposés. Sans cela, la gouvernance territoriale en matière de lumière nocturne repose sur une base fragile, exposée aux interprétations approximatives, aux simplifications abusives et aux contresens opérationnels.

Cette exigence de mise en cohérence renvoie directement aux attentes et aux besoins des collectivités, des gestionnaires d'espaces naturels et des services techniques. Ces acteurs sont confrontés à des décisions très concrètes qui supposent d'articuler des dimensions multiples – biodiversité, sécurité, pratiques sociales, attractivité touristique, contraintes réglementaires, coûts énergétiques, représentations culturelles de la nuit – dans des contextes territoriaux toujours singuliers. Ils se trouvent alors en demande d'indicateurs, de repères, de seuils, voire de solutions, alors que la littérature scientifique, de son côté, produit essentiellement des modèles explicatifs et des résultats de recherche rarement formulés en termes directement opératoires. Une synthèse bibliographique ne vise pas à transformer la science en prescriptif, mais à offrir une vision ordonnée de ses apports : elle met en perspective les résultats parfois contradictoires, elle expose les conditions expérimentales qui encadrent leur validité, elle explicite les controverses et les limites méthodologiques, elle distingue les mécanismes bien documentés des hypothèses encore spéculatives. Ce travail permet aux acteurs territoriaux de disposer d'un socle commun de compréhension, sans lequel toute stratégie d'aménagement nocturne risque d'être guidée par des intuitions, des habitudes ou des représentations culturelles héritées plutôt que par un rapport éclairé aux lignes de preuve disponibles. Une telle synthèse devient ainsi un véritable instrument d'intelligence collective, qui ne prescrit pas des solutions prêtes à l'emploi mais rend possible un arbitrage éclairé entre différentes voies d'action.

Une autre raison fondamentale rendant indispensable une synthèse bibliographique tient au risque de dérive technocratique que comporte la gestion de la nuit. Face à un problème complexe, polycentrique et profondément relationnel comme la pollution lumineuse, la tentation est souvent grande de recourir à des dispositifs normatifs ou métriques standardisés, en supposant que la maîtrise technique des flux lumineux suffise à régler les problèmes écologiques et sociaux. C'est le cas, par exemple, des découplages récurrents

entre la mesure photométrique et les effets biologiques, des zonages appliqués sans véritable ancrage écologique, ou encore des modèles de continuités écologiques conçus comme des abstractions spatiales déconnectées des dynamiques de terrain. Cette tendance à la simplification repose en partie sur une méconnaissance de la littérature scientifique la plus récente, qui souligne au contraire les effets indirects, les cascades écologiques, les interactions avec d'autres pressions anthropiques, les dynamiques adaptatives des espèces, ainsi que les dimensions culturelles, paysagères et politiques de la nuit. La synthèse bibliographique joue un rôle critique en rappelant que la lumière n'est jamais un simple flux, mais un élément structurant d'un milieu nocturne vivant, hétérogène et dynamique. Elle montre que les prescriptions technocratiques, lorsqu'elles ignorent cette complexité, peuvent produire des effets inattendus, des maladaptations ou des conflits sociaux. Elle invite les institutions à dépasser les approches réductrices et à concevoir la gouvernance de la lumière nocturne non comme un problème d'ingénierie, mais comme un enjeu écologique, territorial et politique.

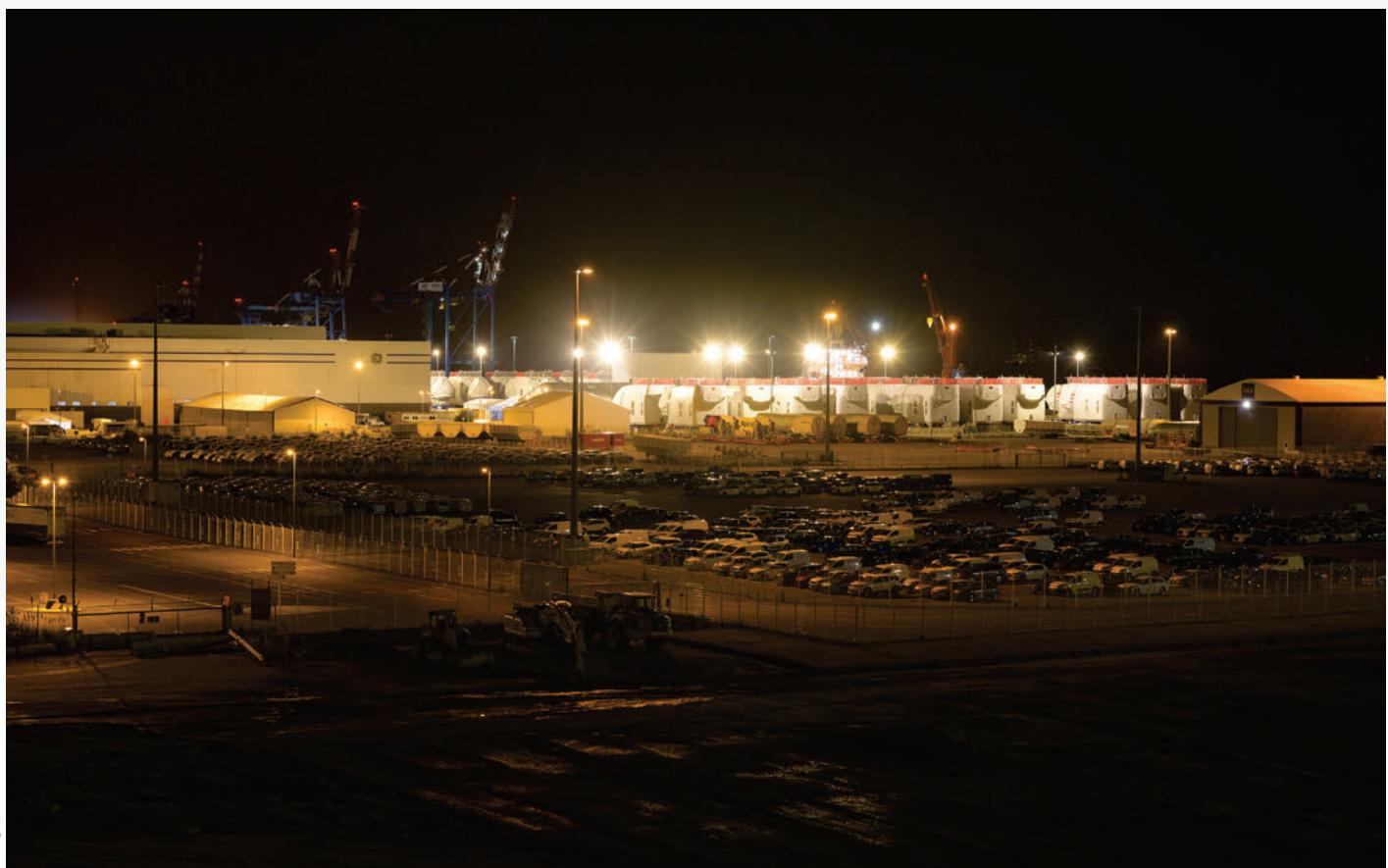
La synthèse bibliographique offre également un levier essentiel pour construire une véritable gouvernance adaptive et située de la pollution lumineuse. Les territoires ne sont pas des surfaces neutres, mais des assemblages vivants d'acteurs, d'usages, d'infrastructures, d'histoires locales, de contraintes matérielles et de valeurs sociales. Pour que les politiques nocturnes puissent émerger, s'ajuster et se stabiliser, il faut disposer d'une vision claire des interactions entre sources lumineuses, habitats, continuités écologiques, usages sociaux de la nuit, dispositifs réglementaires, paysages culturels et dynamiques économiques. Une synthèse bien construite permet d'expliquer ces interactions, de documenter les marges d'incertitude, de situer les connaissances dans une pluralité de contextes et de fournir des éléments de compréhension partagée qui facilitent la délibération collective. Elle devient ainsi un support de dialogue entre services techniques, élus, gestionnaires, associations, acteurs économiques ou

habitants. En clarifiant les controverses scientifiques et en identifiant ce qui est suffisamment robuste pour orienter des choix publics, elle facilite la construction de compromis territoriaux durables.

Enfin, la synthèse bibliographique constitue une pièce centrale dans l'articulation entre régulation, expérimentation et évaluation. La gestion de la lumière nocturne ne peut se résumer à l'édition de normes : elle doit s'inscrire dans des trajectoires d'apprentissage, faites de projets pilotes, d'ajustements progressifs, de retours d'expérience et de suivis écologiques ou socio-spatiaux. La littérature scientifique fournit des éléments pour penser cette articulation, mais ceux-ci demeurent souvent dispersés. Synthétiser ces résultats, c'est permettre aux acteurs territoriaux de choisir des indicateurs pertinents, de sélectionner des méthodes de suivi adaptées, de repérer ce qui a été testé ailleurs et d'anticiper les effets non intentionnels. C'est aussi leur donner la possibilité d'inscrire leurs actions dans une temporalité longue, indispensable à l'évaluation écolo-

gique des mesures d'atténuation ou d'extinction, dont les effets ne se manifestent que rarement à court terme.

En définitive, une synthèse bibliographique interdisciplinaire, critique et contextualisée n'est pas une simple opération de compilation. Elle constitue un outil structurant de la gouvernance territoriale de la nuit, un moyen d'ordonner l'état des savoirs, de clarifier les marges d'incertitude, de prévenir les simplifications hâtives et de soutenir les dynamiques de coopération entre acteurs. Elle permet d'ouvrir un espace de décision informé, où la complexité de la nuit devient non pas un obstacle mais un terrain de réflexion collective, ancré dans des connaissances partagées et dans une responsabilité commune envers les milieux nocturnes.



Photographie : David Loose





Photographie : David Loose



Photographie : Samuel Challéat

LES PRODUCTIONS OPÉRANT UNE APPROCHE GLOBALE DE LA POLLUTION LUMINEUSE

Light pollution in complex ecological systems

La pollution lumineuse dans les systèmes écologiques complexes

Revue

Philosophical Transactions of the Royal Society B (numéro thématique)

Auteurs

M.R. Hirt, D.M. Evans, C.R. Miller, & R. Ryser

Institution d'affiliation du premier auteur

German Centre for Integrative Biodiversity Research (iDiv), Allemagne.

Résumé

L'article propose une synthèse ambitieuse sur la manière dont la pollution lumineuse agit au sein de systèmes écologiques complexes. Les auteurs rappellent d'abord que la plupart des organismes dépendent des cycles naturels de lumière pour se repérer, s'orienter, se synchroniser ou réguler leurs fonctions biologiques. L'introduction massive et récente de la lumière artificielle nocturne constitue donc une perturbation évolutivement nouvelle, à laquelle peu d'espèces sont préparées. Si les effets physiologiques et comportementaux de l'éclairage nocturne sur les individus sont bien documentés, on connaît en revanche beaucoup moins la manière dont ces effets se propagent à des niveaux d'organisation supérieurs – interactions, communautés, réseaux trophiques, écosystèmes – ce qui limite notre capacité à anticiper ses impacts réels.

L'article insiste sur la diversité des propriétés physiques de la lumière artificielle – intensité, durée et moment d'éclairage, spectre, diffusion atmosphérique – qui conditionnent des réponses écologiques complexes et parfois contradictoires. Les auteurs soulignent l'importance particulière du *skyglow*, halo lumineux diffus et omniprésent, souvent très faible en intensité mais potentiellement lourd de conséquences car de nombreux organismes sont adaptés à des signaux lumineux subtils tels que la lune ou les étoiles. Plusieurs travaux récents montrent que même de faibles illuminances diffuses peuvent modifier la biomasse végétale, les comportements de prédation, les réseaux trophiques ou la dynamique des communautés de sol ou d'insectes. À partir de ces bases, l'article expose comment les perturbations individuelles se répercutent en cascade : une modification des

PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS B

royalsocietypublishing.org/journal/rstb

Check for updates

Introduction

Cite this article: Hirt M.R., Evans D.M., Miller C.R., Ryser R. 2023 Light pollution in complex ecological systems. *Phil. Trans. R. Soc. B* 378: 20220351. <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0351>

Received: 29 September 2023
Accepted: 2 October 2023

One contribution of 17 to a theme issue 'Light pollution in complex ecological systems'.

Subject Areas:
ecology, ecosystems

Keywords:
artificial light at night, community, ecosystem, modelling, network, global change

Authors for correspondence:
Myriam R. Hirt
e-mail: myriam.hirt@idiv.de
Remy Ryser
e-mail: remo.ryser88@gmail.com

Light pollution in complex ecological systems

Myriam R. Hirt^{1,2}, Darren M. Evans³, Colleen R. Miller^{4,5} and Remo Ryser^{1,2}

¹German Centre for Integrative Biodiversity Research (iDiv) Halle-Jena-Leipzig, Postbox 14010 Leipzig, Germany
²Institute of Biodiversity, Friedrich-Schiller-University Jena, Jena, 07743, Germany
³School of Natural and Environmental Sciences, Newcastle University, Newcastle upon Tyne, NE1 4LB, UK
⁴Department of Ecology & Evolutionary Biology, Cornell University, Ithaca, NY, 14853, USA
⁵Cornell Laboratory of Ornithology, Ithaca, NY, 14853, USA

© RMB, 0000-0002-8112-2026; DME, 0000-0003-4661-676; CRM, 0000-0002-2534-2109; RR, 0000-0002-3771-8986

Light pollution has emerged as a burgeoning area of scientific interest, receiving increasing attention in recent years. The resulting body of literature has revealed a diverse array of species-specific and context-dependent responses to artificial light at night (ALAN). Because predicting and generalizing community-level effects is difficult, our current comprehension of the ecological impacts of light pollution on complex ecological systems is still notably limited. It is essential to better understand ALAN's effects at higher levels of ecological organization in order to comprehend and mitigate the repercussions of ALAN on ecosystem functioning and stability amidst ongoing global change. This theme issue seeks to explore the effects of light pollution on complex ecological systems, by bridging various realms and scaling up from individual processes and functions to communities and networks. Through this integrated approach, this collection aims to shed light on the intricate interplay between light pollution, ecological dynamics and humans in a world increasingly impacted by anthropogenic lighting.

This article is part of the theme issue 'Light pollution in complex ecological systems'.

1. Introduction

Organisms of most forms have adapted to using light as a source of energy or information. Primary producers such as plants, algae and cyanobacteria use light to synthesize complex molecules, grow and store energy. The overwhelming majority of organisms also use light as a carrier of information. For instance, light allows many organisms to process information about the abiotic and biotic environment. Moreover, variability in the light regime works like a metronome for many organisms by determining the timing and duration of days, months (or moon cycles) and seasons. For example, some plants use this information to time the onset of developing leaves or flowers [1], while corals have been shown to align the time point of spawning with the moon [2–4] and nocturnal animals usually start their daily activity after solar irradiance drops below a certain level [5]. Furthermore, some animals use light for orientation. For example, sea turtle hatchlings find their way to the ocean by moving towards the brighter horizon, which under natural conditions is over the ocean [6] and some birds and other animals can even navigate by starlight [7,8]. Overall, this highlights that natural light cycles are of immense importance for life on Earth.

The natural light regime, however, was disrupted when humans began to artificially light the night by using fire from wood, candles and oil lamps. The pollution of the night sky was recognized for the first time by astronomers in the first half of the twentieth century [9] as it started to interfere with their celestial observations, and this phenomenon soon attracted the attention of a

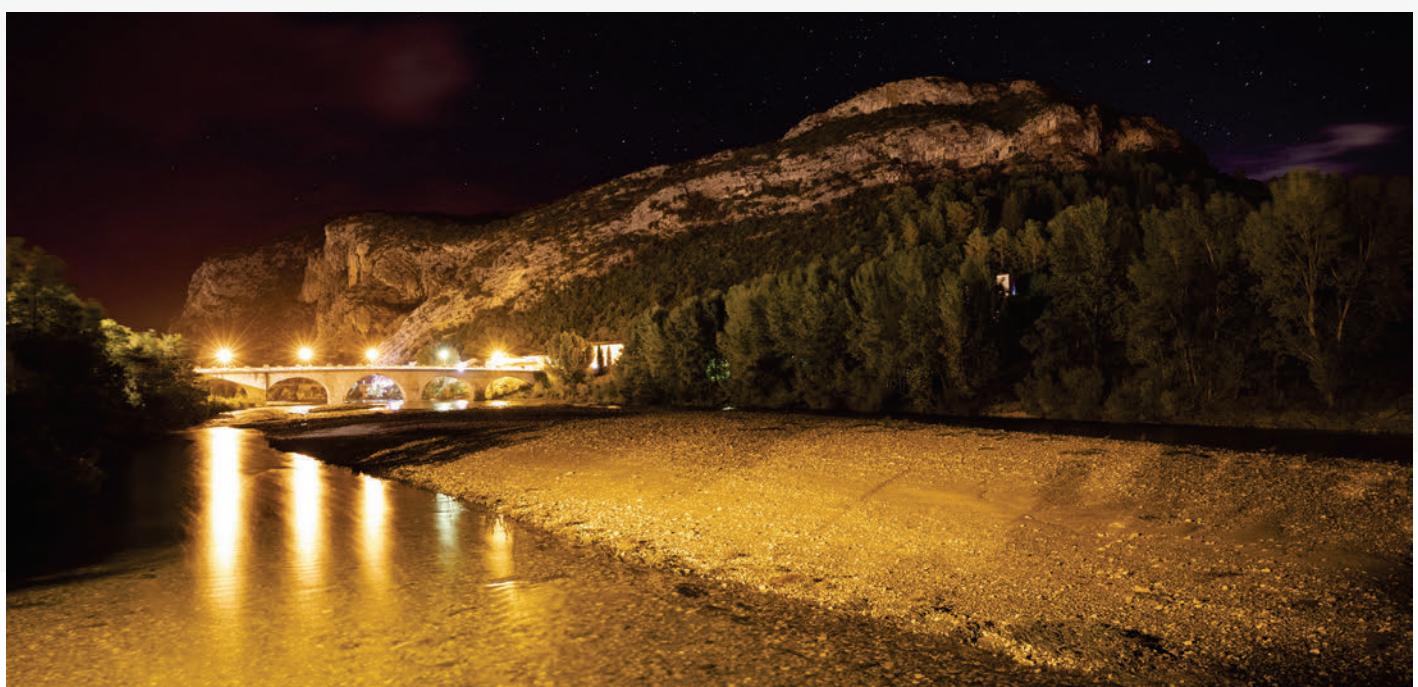
© 2023 The Authors. Published by the Royal Society under the terms of the Creative Commons Attribution License <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>, which permits unrestricted use, provided the original author and source are credited.

rythmes circadiens, des comportements de déplacement ou des niveaux hormonaux peut entraîner des changements dans les taux de prédation, la compétition ou l'herbivorie ; ces altérations influencent à leur tour la structure et la stabilité des réseaux écologiques, modifiant la composition des communautés, la diversité, les flux de matière et d'énergie entre systèmes, et finalement le fonctionnement des écosystèmes. Certaines études suggèrent même que l'éclairage nocturne pourrait favoriser l'émergence de communautés « sans analogues historiques », tant il restructure les niches temporelles et les interactions.

Les auteurs insistent sur la nécessité de développer des approches expérimentales quantitatives, notamment des relations dose-réponse, afin de comprendre la forme exacte des effets écologiques de la lumière (linéaires, saturants, non monotones). La plupart des études ne comparent que présence/absence de lumière, ce qui empêche de saisir la complexité réelle des réponses. Une telle compréhension mécaniste est indispensable pour construire des modèles prédictifs capables d'extrapoler les impacts de l'éclairage selon l'intensité, le spectre, la durée, mais aussi dans l'espace et dans le temps.

Enfin, l'article replace les humains au cœur du système : ils sont à la fois les principaux producteurs de lumière, les bénéficiaires de ses usages et les victimes de ses effets directs et indirects. L'éclairage artificiel perturbe les rythmes biologiques humains et peut contribuer à divers problèmes sanitaires ; mais il dégrade aussi les services écosystémiques essentiels, comme la pollinisation, la régulation des ravageurs ou le fonctionnement des sols et des milieux aquatiques. Certaines conséquences indirectes affectent même les risques sanitaires, notamment via les déplacements et comportements des espèces vectrices de maladies.

Les auteurs concluent que la pollution lumineuse doit être étudiée – et gérée – comme un facteur de changement global à part entière : elle traverse les échelles, les écosystèmes et les réseaux, relie les dynamiques écologiques à des décisions techniques et sociales, et nécessite une approche interdisciplinaire intégrant biologie, physique de la lumière, modélisation, comportement humain et politiques de mitigation. L'ensemble du numéro thématique auquel appartient l'article vise ainsi à combler les lacunes majeures de connaissance et à favoriser l'émergence de stratégies de gestion fondées sur une compréhension systémique de la nuit et de sa perturbation.



Photographie : Samuel Chaléat

Losing the darkness

Perdre l'obscurité (introduction au numéro thématique)

Revue

Science (numéro thématique)

Auteurs

K.T. Smith, B. Lopez, S. Vignieri, & B. Wible

Institution d'affiliation du premier auteur

AAAS Science International: Cambridge, GB.

Traduction de l'introduction à la section thématique

Pendant la majeure partie de l'histoire humaine, les seules lumières créées par les hommes étaient des flammes nues. La vie quotidienne était rythmée par le lever et le coucher du soleil, les activités nocturnes en extérieur dépendaient des phases de la Lune, et l'observation des étoiles était une pratique courante et culturellement importante. Aujourd'hui, le déploiement massif de l'éclairage électrique extérieur fait que la nuit n'est plus sombre pour la majorité des gens — rares sont ceux qui peuvent encore voir la Voie lactée depuis leur domicile. L'éclairage extérieur a de nombreux usages légitimes qui ont bénéficié à nos sociétés. Cependant, il entraîne souvent une illumination inutile, excessive, intrusive ou dommageable : c'est la pollution lumineuse.

Ce numéro spécial examine les effets de la pollution lumineuse sur le monde naturel, la santé humaine et le ciel nocturne. Il discute des méthodes permettant de mesurer le niveau de pollution lumineuse et des actions possibles pour y remédier.

La quantité de pollution lumineuse et son étendue géographique augmentent rapidement, aggravant ses impacts sur l'environnement. Cette lumière gaspillée consomme d'immenses quantités d'électricité, avec des coûts financiers et des émissions de gaz à effet de serre associés. Bien que les lampadaires soient la source la plus visible d'éclairage extérieur, la pollution lumineuse provient souvent des bâtiments, des véhicules, de la publicité lumineuse, des installations sportives et de nombreuses autres sources.

Heureusement, la pollution lumineuse ne s'accumule pas dans l'environnement : il suffit d'éteindre les lumières pour l'arrêter, même si cela n'est pas toujours possible en pratique. Souvent, les responsables d'un éclairage inadéquat ignorent qu'il génère une pollution nuisible à l'environnement. Un design soigné, une technologie appropriée et une régulation efficace peuvent permettre de conserver les bénéfices de la lumière artificielle nocturne tout en minimisant ses effets néfastes. Si nous échouons, ce qui reste encore de la nuit noire disparaîtra.







Photographie : Samuel Challéat



Photographie : Samuel Challeat

LES CONTRIBUTIONS MARQUANTES DANS LE CHAMP DE L'ASTRONOMIE

Stewardship of space as shared environment and heritage

Gérance de l'espace en tant qu'environnement et patrimoine partagés

Revue

Nature Astronomy

Autrice

A. Venkatesan

Institution d'affiliation du premier auteur

Tracy Seeley Center for Teaching Excellence, University of San Francisco, San Francisco, CA, USA.

Résumé

L'article d'Aparna Venkatesan attire l'attention sur une transformation profonde et souvent méconnue : la manière dont l'orbite terrestre basse, saturée par des milliers de satellites issus pour l'essentiel de még,constellations privées, est en train de modifier non seulement les conditions de la recherche astronomique, mais aussi notre rapport collectif au ciel nocturne. Si ces satellites ouvrent des perspectives prometteuses en matière de télécommunications, d'accès à Internet ou d'applications éducatives, ils génèrent dans le même temps des conséquences préoccupantes, parmi lesquelles la pollution lumineuse, les risques de collisions, la production massive de débris, les failles de cybersécurité et la dégradation progressive d'un environnement encore très peu régulé. Ce constat est d'autant plus alarmant que les astronomes manquent souvent des données nécessaires pour évaluer et anticiper l'ampleur réelle des impacts, faute de transparence et de coordination internationale.

Au-delà de la dimension technique, Venkatesan insiste sur un aspect que les débats publics et industriels négligent presque totalement : le ciel nocturne constitue un patrimoine immatériel universel, un héritage partagé qui relie les sociétés humaines depuis des millénaires. À travers les récits d'origine, les mythes, les traditions spirituelles, les systèmes de navigation, les calendriers, les arts et les sciences, les étoiles ont façonné notre manière de comprendre le monde et notre place dans l'Univers. La vision du ciel, qui a toujours été un point d'ancrage culturel et existentiel, est aujourd'hui altérée de façon tangible par la prolifération de satellites visibles, modifiant une expérience sensible et symbolique que les générations futures risquent de ne plus connaître. Ce changement, rapide et irréversible, affecte notre capacité collective à transmettre une relation ancestrale à la nuit étoilée, et

Worldview

Stewardship of space as shared environment and heritage



Check for updates

<https://doi.org/10.1038/s41550-023-01915-z>

By Aparna Venkatesan

Low Earth orbits are increasingly congested, impacting astronomical observations and dark skies. Globally coordinated regulatory policies and mitigation strategies are among urgent next steps to protect this shared environment and intangible heritage.

We live in noisy times. Our maximally packed and positive environment of orbital objects extend to low Earth orbit (LEO) where we continue the crowding of orbital space and auctioned communications bandwidths. Since 2019, we have seen a growing occupation of LEO that is predicted to accelerate in 2023, predominantly by private entities of spacefaring countries. Such satellite megaconstellations hold great potential for science, education and providing global broadband to bridge the digital divide. However, there are increasing concerns about light pollution (individually as well as collectively from satellites), environmental degradation, cybersecurity breaches and the potential for debris in space. Astronomers are working to develop mitigation solutions building from educated guesswork, dialogue with industry and limited access to data on LEO crowding. Without coordinated global regulation and oversight, clear international protocols for orbital debris removal, or mitigation standards for environmental impacts, the wide ranging consequences for astronomers and for humanity are an ongoing endeavour of LEO hacking a mole tinged with roulette. We are left with the growing unease of watching the slow motion implosion of a preventable disaster.

At this critical juncture for LEO, binary thinking and piecemeal incremental legislation continue to be a grave disservice. Instead of the artificial separations of scientific versus cultural practices or legislating narrow parts of the electromagnetic spectrum, we must respect and protect the integrative continuum in which all these concerns exist. Astronomers

need to account for the aggregate effects of growing numbers of LEO satellites (see accompanying *Perspective* in this issue). We must also lead dialogue on all available options for broad access to orbital bandwidth, and advocate for equitable outcomes for education and economic development.

Between these islands of tangible issues lies an ocean of ill-assessed intangibles that are overlooked yet vital for our shared human endeavour in space. Astronomers study ancient objects with groundbreaking data, and we must now take a more holistic, sustainable and equitable approach to orbital space. The Moon and beyond. Urgently needed next steps include: making mitigation and environmental assessment, especially aggregate impacts, a condition of satellite licensing; centralizing the US licensing process and space traffic management; and a transparent or science- and coordinated international regulation and oversight. We can draw on hope from recent developments in law: it's after years of stalemate regarding the future of Maunakea's observatories, the new Maunakea Stewardship Oversight Authority is shifting focus from individual constituencies to the stewardship of Maunakea as the shared environment for the benefit of all and future generations. We can achieve this for LEO and space exploration through collective will and collaboration towards sustainable operations, equitable access and the long-term benefit of all constituencies in our shared skies.

Aparna Venkatesan Professor of Physics and Astronomy and Co-Director of the Tracy Seeley Center for Teaching Excellence, University of San Francisco, San Francisco, CA, USA. E-mail: avenkatesan@usfca.edu

Published online: 20 March 2023
nature astronomy

© 2023 The Author(s). *bioRxiv* preprint. All rights reserved. <https://doi.org/10.1101/2023.03.16.531212>

Competing interests

The author is an unpaid member and co-chair of the American Astronomical Society (AAS) Committee on Light Pollution, Radio Interference and Space Debris. The views expressed in this article do not necessarily represent the positions of the AAS or of the University of San Francisco.

pose une question fondamentale : que devient un patrimoine global quand il est transformé par des intérêts principalement privés et marchands ?

Venkatesan souligne que les grands acteurs industriels s'appuient volontiers sur des récits puissants — exploration, colonisation, conquête, destin — pour promouvoir leur présence dans l'espace, mais ces récits, loin de célébrer une vision partagée de l'humanité, tendent à réduire l'espace à une ressource à exploiter. Ils s'opposent à la perspective selon laquelle l'espace devrait être considéré comme un bien commun culturel et environnemental, et contribuent à invisibiliser les préoccupations liées au patrimoine immatériel. Cette dérive narrative participe d'une forme de privatisation symbolique du ciel, qui rompt avec les imaginaires collectifs portés par des traditions scientifiques et culturelles millénaires.

L'autrice rappelle également que si l'humanité se projette de plus en plus dans l'espace — à travers le tourisme spatial, les stations habitées ou les missions lointaines — elle y transportera aussi les inégalités, les discriminations et les violences présentes sur Terre. En l'absence de règles, la culture interne des entreprises privées, parfois marquée par des problèmes systémiques, risque de devenir la norme dans ces nouveaux environnements. Cela accentue encore l'enjeu patrimonial : l'espace n'est pas seulement un lieu physique, mais un prolongement des sociétés humaines où se rejouent des dynamiques sociales, culturelles et politiques.

Face à la fragilisation de ce patrimoine partagé, Venkatesan appelle à une gouvernance internationale forte et cohérente. Elle plaide pour que la protection du ciel nocturne intègre les dimensions culturelles, symboliques et immatérielles au même titre que les aspects techniques ou environnementaux. Elle s'appuie notamment sur l'exemple de Maunakea, à Hawaï, où une nouvelle instance de gouvernance place la « gérance » — *stewardship* — au centre de la gestion d'un lieu reconnu à la fois comme ressource scientifique majeure et comme site culturel et spirituel essentiel pour les communautés autochtones. Ce modèle, qui repose sur la reconnaissance de la pluralité des valeurs associées à un même espace, offre selon elle une inspiration pour la gestion de l'orbite terrestre basse.

En conclusion, l'article élargit considérablement le regard que nous portons sur l'espace : il ne s'agit plus seulement d'un support pour les télécommunications ou l'exploration scientifique, mais d'un héritage commun dont la dégradation menace une dimension fondamentale de l'expérience humaine. Préserver l'obscurité du ciel nocturne, ce n'est pas seulement protéger les observations astronomiques, c'est défendre un patrimoine culturel global, un lien millénaire avec le cosmos, et une part irremplaçable de notre humanité.

* * *



Photographie : David Loosé

LES CONTRIBUTIONS MARQUANTES DANS LES CHAMPS DE LA MÉTROLOGIE ET DE LA MODÉLISATION

Measuring and monitoring light pollution: Current approaches and challenges

Mesurer et surveiller la pollution lumineuse : approches actuelles et défis

Revue

Science (numéro thématique)

Auteurs

M. Kocifaj, S. Wallner, & J.C. Barentine

Institution d'affiliation du premier auteur

Department of Optics, Institute of Construction and Architecture, Slovak Academy of Sciences, 845 03 Bratislava Slovaquie et Department of Experimental Physics, Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University, 842 48 Bratislava, Slovaquie.

Résumé

L'article propose une synthèse des méthodes existantes pour mesurer et surveiller la pollution lumineuse, en soulignant leurs atouts, leurs limites et les défis scientifiques persistants. Les auteurs rappellent que la pollution lumineuse, produite par l'éclairage artificiel nocturne (ALAN), résulte principalement d'émissions mal orientées, d'une surintensité lumineuse, ou de l'usage de spectres inadaptés, notamment riches en bleu. Elle entraîne la formation de dômes lumineux au-dessus des villes, perturbe les écosystèmes, nuit à la santé humaine et compromet les observations astronomiques.

Mesurer cette pollution est indispensable pour comprendre ses causes, évaluer ses effets et guider les politiques de réduction. Pour cela, un large éventail de techniques est mobilisé. Au sol, on utilise notamment des photomètres à canal unique pour suivre la luminance du ciel au zénith, des caméras « all-sky » qui capturent l'ensemble de la voûte céleste en une seule image, et des drones permettant de mesurer localement la lumière reçue dans plusieurs directions, utiles pour étudier les impacts sur la faune. Les auteurs décrivent également les mesures d'éclairage et de luminance liées à la planification urbaine, indispensables pour évaluer les émissions de sources individuelles et optimiser les installations d'éclairage. À ces approches s'ajoutent les observations satellitaires, qui fournissent une vision globale de la lumière émise vers le ciel par les villes et les régions. Elles permettent de suivre les tendances mondiales de l'ALAN, notamment la progression annuelle de la

SPECIAL SECTION LIGHT POLLUTION

REVIEW

Measuring and monitoring light pollution: Current approaches and challenges

Miroslav Kocifaj^{1,2*}, Stefan Wallner^{1,3}, John C. Barentine⁴

Understanding the causes and potential mitigations of light pollution requires measuring and monitoring artificial light at night (ALAN). We review how ALAN is measured, both from the ground and through remote sensing by satellites in Earth orbit. A variety of techniques are described, including single-channel photometers, all-sky cameras, and drones. Spectroscopic differences between light sources can be used to determine which are most responsible for light pollution, but they complicate the interpretation of photometric data. The use of multiple sensors leads to conflicts in the data, which can be resolved by statistical methods. These conflicts provide complementary information to calibrate experiments and interpret their results. Here, we identify several shortcomings and challenges in current approaches to measuring light pollution and suggest ways forward.

Preserving the environment and ensuring sustainability are worldwide challenges. They include the phenomenon of light pollution caused by artificial light at night (ALAN). Light pollution primarily consists of misdirected light emission, illuminating outdoor areas that are not required to be lit. It also includes overexposure to light—use of light with much higher brightness than necessary—and the use of harmful light colors, such as lighting that emits radiation at short optical wavelengths (blue light). Light pollution produces “light domes” visible in the night sky near urban areas, which spread wide and reach into otherwise dark areas, such as protected natural spaces (1). The adverse consequences of light pollution include detrimental effects to flora and fauna and to human health (2–4). Increased night sky brightness (NSB) also impairs astronomical observations of celestial objects (5, 6).

Reducing the negative impact of light pollution requires environmentally responsible urban development. This is often taken to include the widespread conversion of lighting systems from incandescent incandescent or high-intensity gas discharge (HID) lighting to light-emitting diodes (LEDs) (7, 8). However, current trends in the spatial and temporal distribution of ALAN show that switching to LEDs has been counterproductive for light pollution, with observations showing continuous growth in illuminated areas and upward-directed radiation with a rate being $-2\% \text{ per year}$ (9). In isolated locations, the rate of increase can be even higher, with contemporaneous citizen-science data pointing to an increase in observed NSB of nearly 1% per year (10). Mapping NSB across the globe provides a

baseline for investigating the worldwide emergence of light pollution (10).

It is necessary to identify sources and quantify the impact of ALAN, particularly to guide regulations and other mitigation strategies (2, 13). A multitude of measurement techniques are available, providing either single snapshots or continuous monitoring. In addition to long-term monitoring and remote sensing of ALAN, many measurement devices are available, all of which have advantages and shortcomings (14–17). We review the methods behind quantifying light pollution and ALAN, focusing on the diverse functions. We consider current challenges in

baseline for investigating the worldwide emergence of light pollution (10).

It is necessary to identify sources and

quantify the impact of ALAN, particularly to guide

regulations and other mitigation strategies (2, 13).

A multitude of measurement techniques are

available, providing either single

snapshots or continuous monitoring. In addition

to long-term monitoring and remote sensing of

ALAN, many measurement devices are available, all of

which have advantages and shortcomings (14–17).

We review the methods behind quantifying light

pollution and ALAN, focusing on the diverse

functions. We consider current challenges in

“...outdoor lighting design should minimize the amount of blue light emitted...”

determining light pollution influences at urbanized places and predicting how it will change over time. We also provide recommendations on how the measurements can be used more comprehensively in the future.

Quantifying light pollution

Light pollution research uses a large variety of measurement techniques and devices. The right method, instrument, and analytical approach must be chosen for each application in analyzing ALAN and light pollution.

Reducing light pollution influences at urbanized places and predicting how it will change over time. We also provide recommendations on how the measurements can be used more comprehensively in the future.

Quantifying light pollution

Light pollution research uses a large variety of measurement techniques and devices. The right

method, instrument, and analytical approach

must be chosen for each application in analyzing

ALAN and light pollution.

Reducing light pollution influences at urbanized

places and predicting how it will change over

time. We also provide recommendations on

how the measurements can be used more

comprehensively in the future.

Quantifying light pollution

Light pollution research uses a large variety of measurement techniques and devices. The right

method, instrument, and analytical approach

must be chosen for each application in analyzing

ALAN and light pollution.

Reducing light pollution influences at urbanized

places and predicting how it will change over

time. We also provide recommendations on

how the measurements can be used more

comprehensively in the future.

Reducing light pollution influences at urbanized

places and predicting how it will change over

time. We also provide recommendations on

how the measurements can be used more

comprehensively in the future.

Reducing light pollution influences at urbanized

places and predicting how it will change over

time. We also provide recommendations on

how the measurements can be used more

comprehensively in the future.

Reducing light pollution influences at urbanized

places and predicting how it will change over

time. We also provide recommendations on

how the measurements can be used more

comprehensively in the future.

Reducing light pollution influences at urbanized

places and predicting how it will change over

time. We also provide recommendations on

how the measurements can be used more

comprehensively in the future.

Check for updates

Downloaded from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031942223000116 by guest on 19 November 2023

Kocifaj et al., Science 390, 1221–1224 (2023) 16 June 2023

1 of 6

radiance émise vers le haut et l'expansion des zones éclairées. Cependant, les satellites actuels présentent des limites spectrales, étant peu sensibles au bleu, ce qui complique l'évaluation des effets de la transition vers les LED blanches.

Les auteurs insistent par ailleurs sur la nécessité de prendre en compte la variabilité atmosphérique. La diffusion de la lumière dans l'atmosphère dépend fortement des conditions météorologiques et de la présence d'aérosols, rendant les comparaisons temporelles délicates sans mesures atmosphériques complémentaires. Ainsi, deux nuits consécutives peuvent produire des niveaux de pollution lumineuse très différents malgré des conditions d'éclairage identiques. Les modèles théoriques jouent donc un rôle crucial pour simuler la propagation de la lumière et compléter les données empiriques, mais souffrent eux aussi d'incertitudes liées à la complexité des sources lumineuses urbaines.

L'article souligne plusieurs défis majeurs : l'absence de normes internationales pour les protocoles de mesure, les limites spectrales et dynamiques des instruments, l'influence déterminante de l'atmosphère sur les mesures, les variations locales du parc lumineux, ou encore la difficulté à obtenir des séries temporelles complètes. Malgré cela, les auteurs rappellent que les données accumulées — même imparfaites — ont une valeur considérable pour suivre l'évolution du phénomène, améliorer les modèles et éclairer les décisions en matière d'urbanisme, de conservation ou de gestion de l'environnement nocturne.

Enfin, ils plaident pour une coordination renforcée entre expérimentateurs et modélisateurs, ainsi que pour le développement de standards de mesure et d'instruments plus sensibles. Dans un contexte où la pollution lumineuse continue de croître à l'échelle mondiale, améliorer la qualité, l'homogénéité et l'interprétation des mesures apparaît indispensable pour produire un diagnostic fiable et soutenir les efforts de réduction de l'ALAN.

* * *



Photographie : David Loose

Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022

Mesurer et surveiller la pollution lumineuse : approches actuelles et défis

Revue

Science

Auteurs

C.C.M. Kyba,^{1,2} Y.Ö. Altintas,¹ C.E. Walker,³ M. Newhouse⁴

Institution d'affiliation du premier auteur

Ruhr-Universität Bochum: Bochum, Nordrhein-Westfalen, Allemagne.

Résumé

L'article de Kyba et ses collègues examine l'évolution de la luminosité du ciel nocturne — le *skyglow* — à l'échelle globale entre 2011 et 2022, en s'appuyant sur un vaste corpus de plus de 51 000 observations citoyennes collectées dans le cadre du programme *Globe at Night*. Ce dispositif participatif invite des volontaires du monde entier à comparer la vision de leur ciel nocturne à diverses cartes stellaires afin d'estimer la magnitude limite à l'œil nu (NELM), qui correspond à la luminosité des étoiles les plus faibles encore visibles. Comme la visibilité des étoiles décroît lorsque le fond de ciel s'éclaircit, la NELM fournit un indicateur direct et sensible de la pollution lumineuse telle que perçue par les humains.

L'étude part d'un constat déjà largement documenté : l'éclairage artificiel nocturne s'est considérablement intensifié au cours du XXe siècle, modifiant l'apparence de la nuit et affectant les cycles biologiques, les interactions écologiques et les pratiques culturelles liées à l'observation du ciel. Mais les tendances récentes restaient mal connues, notamment en raison des limites des outils satellitaires actuellement disponibles, qui disposent d'une sensibilité limitée aux courtes longueurs d'onde et ne permettent pas de mesurer la lumière émise horizontalement, pourtant très contributrice au *skyglow*.

Pour pallier ces limites, les auteurs exploitent les observations citoyennes et les couplent aux données issues du *World Atlas of Artificial Night Sky Brightness* (2016). Ils élaborent un modèle statistique robuste destiné à extraire des tendances temporelles tout en tenant compte de la variabilité des contributeurs, des biais de localisation et des conditions environnementales. Leur analyse se concentre sur des observations réalisées en l'absence de crépuscule, de clair de lune et de neige au sol, afin d'isoler au mieux la part de lumière artificielle. La démarche permet d'établir des tendances pour l'Europe, l'Amérique du Nord et un ensemble d'autres régions regroupées sous l'étiquette « *Rest of World* », en raison de données moins homogènes.

Les résultats sont particulièrement frappants : à l'échelle globale, les auteurs estiment que la luminosité du ciel augmente de 9,6 % par an en moyenne, ce qui correspond à une croissance cumulée extrêmement rapide. À ce rythme, la luminosité du ciel pourrait être multi-

RECHERCHE

LIGHT POLLUTION

Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022

Christopher C. M. Kyba,^{1,2} Yigit Öner Altintas,¹ Constance E. Walker,³ Mark Newhouse⁴

The artificial glow of the night sky is a form of light pollution; its global change over time is not well known. Developments in lighting technology complicate any measurement because of changes in lighting practice and emission spectra. We investigated the change in global sky brightness from 2011 to 2022 using 51,353 citizen scientist observations of naked-eye stellar visibility. The number of visible stars decreased over time and this can be explained by an increase in sky brightness of 7 to 10% per year in the human visible band. This increase is faster than emission changes indicated by satellite observations. We ascribe this difference to spectral changes in light emission and to the average angle of light emission.

Over much of Earth's land surface, the night sky no longer fully transitions to starlight and moonlight after sunset (1). Instead, the sky glows with an artificial twilight caused by the scatter of ambient light from the ground (2). The radiance of skylight, ϕ , experienced for much of the 20th century (3) as a result of population growth, expansion of settlements, and deployment of new lighting technologies (4, 5). The character of the night sky is now different from what it was when life evolved and civilization developed.

Many of the behavioral and physiological processes of life on Earth are connected to daily and seasonal cycles. For example, visual predation requires sufficient light to see, and predator-prey interactions are therefore expected to change from day to night. There are few controlled field studies of the ecological impacts of skylight, but it has been shown to affect plants, animals, and their interactions (7), and laboratory studies have demonstrated changes in the physiology of the eye as skylight and light-dark alternation of the eye (8). In addition to its environmental consequences, skylight limits human observation of starry skies and the Milky Way. The increase in skylight has affected human culture (9), not only by restricting stargazing and astronomy but also by changing the overall appearance of the night sky.

Effective methods for reducing light pollution are well understood (10, 11), and many of them also reduce electricity consumption.

Remote Sensing and Geomatics, Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) Potsdam, Germany; ²Geodatenzentrum für Raum- und Umweltforschung (GZFU), Bochum, Germany; ³Office of Observatory Site Protection, National Optical Astronomy Observatory Research Laboratories, Tucson, AZ 85731, USA; ⁴Science, Technology, and Engagement, National Optical-Infrared Astronomy Research Laboratory, Tucson, AZ 85731, USA

*Corresponding author. Email: kyba@geo.psu.edu

†Present address: European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites, 64295 Darmstadt, Germany.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

Editor's Summary in *Science* at <https://doi.org/10.1126/science.379.8530.265>

DOI: 10.1126/science.379.8530.265

Copyright 2023. American Association for the Advancement of Science.

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license.

For a detailed description of the license, see <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Published online January 29, 2023; accepted January 29, 2023.

pliée par plus de quatre en une vingtaine d'années, modifiant radicalement l'expérience du ciel nocturne pour une génération entière. Concrètement, un lieu permettant d'observer 250 étoiles n'en laisserait plus voir qu'une centaine après une génération — une réduction drastique qui illustre une perte importante de l'accès humain au ciel étoilé. Les auteurs observent des disparités régionales : en Amérique du Nord, l'augmentation est estimée à plus de 10 % par an, tandis qu'en Europe, elle avoisine 6 à 7 %. Dans le reste du monde, elle est proche de 7 à 8 %, bien que les données y soient moins abondantes. Malgré ces variations, la tendance générale reste la même : partout où les observations sont suffisantes, la visibilité des étoiles se dégrade rapidement.

L'un des apports majeurs de l'article est la comparaison explicite entre ces résultats et les estimations issues des satellites. Alors que les observations satellitaires indiquent une augmentation beaucoup plus modérée — souvent autour de 1 à 2 % par an — les auteurs montrent que ces instruments échouent à capturer une partie significative de la lumière émise vers le ciel. Les satellites ne détectent pas les longueurs d'onde inférieures à 500 nm, c'est-à-dire celles où les LED modernes émettent fortement. Or, la transition massive vers les LED, amorcée au début des années 2010, a déplacé les spectres d'émission vers le bleu, ce qui augmente l'efficacité de diffusion atmosphérique et amplifie le *skyglow* vu depuis le sol, sans augmenter proportionnellement la luminance dans les bandes auxquelles les satellites sont sensibles.

Cette dissociation entre données satellitaires et observations humaines montre que la pollution lumineuse progresse plus rapidement que ce que les indicateurs globaux laissaient croire. Les auteurs expliquent également que la lumière émise horizontalement — provenant notamment de vitrines, enseignes, panneaux, véhicules ou éclairages décoratifs — échappe largement à la détection spatiale tout en représentant une source majeure de *skyglow*. Ce problème s'accentue quand les luminaires sont mal orientés, quand les LED sont installées sans précaution ou quand les usages non fonctionnels de la lumière se développent. L'étude pointe également un probable effet rebond : l'efficacité énergétique élevée des LED peut encourager les collectivités et les particuliers à installer davantage de points lumineux, à augmenter l'intensité d'éclairage ou à allonger les durées de fonctionnement, annulant ainsi les économies et aggravant la pression lumineuse nocturne. Cela expliquerait pourquoi l'introduction généralisée des LED n'a pas permis d'inverser la tendance, et pourquoi des régions pourtant engagées dans des politiques d'éclairage responsable voient néanmoins leur ciel s'éclaircir d'année en année.

L'article insiste sur le caractère profondément complémentaire des observations citoyennes : là où les satellites produisent des séries numériques robustes mais incomplètes, les contributions humaines captent ce qui importe réellement pour la perception humaine du ciel et pour la biodiversité nocturne. Elles permettent de détecter des tendances que les capteurs spatiaux ne peuvent pas mesurer. Les auteurs soulignent aussi que les contributions proviennent principalement de zones densément éclairées — Europe, Amérique du Nord, Japon — ce qui signifie que la situation pourrait être pire dans des régions où l'éclairage augmente rapidement mais où les observations citoyennes sont rares.

En conclusion, l'étude livre un message clair : la visibilité des étoiles décline rapidement à l'échelle mondiale, et les politiques actuelles ne suffisent pas à enrayer la progression du *skyglow*. L'introduction des LED, en l'absence de normes strictes sur les spectres, les orientations et les usages, semble même accélérer cette dynamique. L'équipe appelle à renforcer les politiques publiques, à développer de nouveaux capteurs satellitaires sensibles aux longueurs d'onde courtes, à harmoniser les données issues du sol et de l'espace, et à poursuivre le développement de la science citoyenne pour suivre en temps réel l'évolution du ciel nocturne. L'enjeu n'est pas seulement scientifique : il concerne la perte progressive d'un patrimoine visuel, culturel et écologique fondamental — celui de la nuit étoilée.





Photographie : Samuel Challeat

LES CONTRIBUTIONS MARQUANTES DANS LE CHAMP DES SCIENCES DU VIVANT

Shedding light on the effects of LED streetlamps on trees in urban areas: Friends or foes?

Mise en lumière des effets des luminaires à LED sur les arbres en milieu urbain : amis ou ennemis ?

Revue

Science of the Total Environment

Auteurs

E. Lo Piccolo, G. Lauria, L. Guidi, D. Remorini, R. Massai, & M. Landi

Institution d'affiliation du premier auteur

Università degli Studi di Firenze, Florence, Italie.

Résumé

L'article étudie de manière expérimentale l'impact des lampadaires LED sur deux espèces d'arbres urbains parmi les plus répandues en Europe : *Platanus × acerifolia* (platane) et *Tilia platyphyllos* (tilleul). À la suite du remplacement massif des lampes au sodium par des LED émettant davantage de lumière bleue et rouge – des longueurs d'onde particulièrement efficaces pour la photosynthèse – les auteurs cherchent à comprendre comment cette technologie influence la physiologie et les rythmes saisonniers des arbres.

Les chercheurs ont cultivé des individus des deux espèces sous deux intensités réalistes de lampadaires LED (300 et 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), en les comparant à des arbres témoins non éclairés la nuit. Ils ont suivi durant toute la saison végétative plusieurs paramètres : échanges gazeux, teneur en chlorophylle, teneur en amidon et en sucres, et phénologie automnale.

Les résultats montrent que les LED perturbent profondément les processus physiologiques, et cela de manière similaire pour les deux intensités testées. Les feuilles éclairées la nuit présentent des taux de photosynthèse positifs, alors que les témoins respirent normalement, ce qui signifie que les arbres continuent à assimiler du CO₂ au lieu d'entrer dans la phase nocturne prévue par leur horloge circadienne. Mais, en contrepartie, les feuilles montrent un affaiblissement marqué de leur performance photosynthétique au lever du soleil, suggérant un stress physiologique ou un dérèglement des mécanismes de récupération nocturne. Les deux espèces développent également des teneurs plus élevées en

Science of the Total Environment 665 (2022) 161200

Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

Journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv

Science of the Total Environment

Shedding light on the effects of LED streetlamps on trees in urban areas: Friends or foes?

E. Lo Piccolo^a, G. Lauria^b, L. Guidi^{b,c}, D. Remorini^{b,c}, R. Massai^{b,c}, M. Landi^{b,c,d,e}

^a Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry, University of Florence, Florence, Italy

^b Department of Agriculture, Food and Environmental University of Pisa, via del Babeto, 8, 56124 Pisa, Italy

^c CNR-IEF, Centre for Climate Change Impact, University of Pisa, Italy

HIGHLIGHTS

- Streetlamp illumination induced CO₂ assimilation in *Platanus* and *Tilia* at night.
- At night, illuminated *Platanus* and *Tilia* showed lower photosynthetic performance.
- Streetlamp illumination increased the chlorophyll content in the leaves.
- Streetlamp illumination affected primary metabolism lowering leaf starch accumulation.
- In *Platanus* trees, streetlamp illumination delayed the onset of winter dormancy.

GRAPHICAL ABSTRACT

ARTICLE INFO

Editor: Enzo Padellari

Keywords: *Keywords* *Chlorophyll* *Chlorophyll a* *Light intensity* *Photosynthesis* *Urban environment* *Urban lighting*

ABSTRACT

Streetlamp illumination disrupts the natural physiological processes and circadian rhythms of living organisms, including photosynthesis and dormancy. The light emitted during LED technology has higher photon energy than incandescent lamps, the effect of LED illumination on certain trees need to be checked as these organisms have a different light spectrum (with a peak in the blue and red regions of the spectrum, i.e., highly efficient wavelengths for photosynthesis) compared to older technologies. To address the above-mentioned issue, two widely utilized tree species in the urban environment, including *Platanus × acerifolia* (P) and *Tilia platyphyllos* (T), were grown with or without the effect of LED streetlamps at two different intensities (300 and 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). A *Growth chamber* was used to study the seasonal features (starch, soluble sugar, and chlorophyll content) of illuminated vs non-illuminated trees were compared during the whole vegetative season. Our results showed that both tree species were strongly influenced by LED streetlamps at physiological and biochemical levels. Specifically, the mature leaves of P and T streetlamp-illuminated trees had a lower starch content at dawn than in darkness, had higher starch content with a starch content that increased. Our results showed that the difference between the effect of the two different light intensities on the physiological attributes of P and T trees were not statistically significant, suggesting the absence of a dose-dependent effect. The most significant difference between T and P trees concerning the LED-triggered species-specific effect was that the delay in winter dormancy occurred only in P individuals. This study provided insights into the effects of LED streetlamps on trees. Our findings might raise awareness of the necessity to provide less impacting solutions to improve the well-being of trees in the urban environment.

* Corresponding author at: Department of Agriculture, Food and Environment, University of Pisa, via del Babeto, 8, 56124 Pisa, Italy. E-mail address: mauro.landi@unipi.it.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161200>
Received 4 November 2022; Received in revised form 22 December 2022; Accepted 22 December 2022
Available online 27 December 2022
0048-9697/© 2022 Elsevier B.V. All rights reserved.

chlorophylle, probablement parce que le spectre des LED (riche en bleu et rouge) bloque la baisse naturelle de la synthèse de chlorophylle pendant la nuit. La dynamique des glucides est également perturbée : les arbres éclairés accumulent moins d'amidon le jour, et en dégradent davantage la nuit, ce qui indique un rythme jour/nuit altéré. Ces modifications se manifestent différemment selon les stades foliaires, mais elles sont nettes pour les feuilles jeunes comme pour les feuilles matures.

La perturbation la plus spectaculaire concerne le platane : chez cette espèce, l'éclairage nocturne retarde nettement la sénescence automnale et l'entrée en dormance hivernale, un phénomène observé aussi dans de nombreuses villes. Le tilleul, en revanche, ne montre pas ce décalage phénologique, bien qu'il subisse des perturbations physiologiques importantes. Cela suggère que les réponses dépendent de la manière dont chaque espèce perçoit et utilise le photopériodisme.

Globalement, l'étude révèle que les lampadaires LED, même à des intensités faibles et sans effet thermique, exercent des effets profonds sur les arbres urbains. Ils modifient leurs rythmes physiologiques, altèrent leur métabolisme énergétique et peuvent perturber leur phénologie, avec des implications pour leur santé, leur résistance au froid, et la gestion des espaces verts urbains. Les auteurs appellent à concevoir des solutions d'éclairage moins perturbatrices pour les arbres, notamment des spectres lumineux moins absorbés par les pigments photosynthétiques.

* * *



Photographie : David Loose

Manipulating spectra of artificial light affects movement patterns of bats along ecological corridors

La manipulation des spectres de lumière artificielle affecte les déplacements des chauves-souris le long des corridors écologiques

Revue

Animal Conservation

Auteurs

K. Barré, I. Thomas, I. Le Viol, K. Spoelstra, & C. Kerbiriou

Institution d'affiliation du premier auteur

Centre d'Ecologie et des Sciences de la Conservation (CESCO), Muséum national d'Histoire naturelle, CNRS, Sorbonne Université, Paris, France et Centre d'Ecologie et des Sciences de la Conservation (CESCO), Muséum national d'Histoire naturelle, Station de Biologie Marine, Paris, France.

Résumé

L'article de Barré et alii explore de manière fine la manière dont les différentes couleurs de lumière artificielle – en l'occurrence la lumière blanche, verte et rouge – influencent le comportement spatial des chauves-souris dans un corridor écologique. Alors que de nombreuses études se sont concentrées sur l'activité acoustique ou sur la présence/absence des chauves-souris autour des lampadaires, celle-ci se distingue en examinant directement la dynamique des trajectoires de vol. L'objectif est de comprendre si et comment les chauves-souris modifient leur façon de se déplacer lorsqu'elles rencontrent une source lumineuse, et si certaines couleurs sont réellement plus « compatibles » avec la continuité écologique.

Pour cela, les chercheurs ont installé un dispositif expérimental dans une lisière forestière, un milieu particulièrement important pour les déplacements nocturnes des chauves-souris. Vingt-huit lampadaires ont été utilisés, chacun pouvant émettre un spectre lumineux particulier ou rester éteint. Autour de ces lampadaires, un ensemble dense de microphones a permis de localiser en trois dimensions les chauves-souris en vol grâce à leur écholocalisation. Ce protocole a donné accès à des milliers de trajectoires précises, permettant d'observer non seulement si les chauves-souris passaient à proximité, mais aussi comment elles réagissaient exactement lorsqu'elles s'approchaient d'une zone éclairée.

Les résultats montrent que la lumière agit comme un véritable filtre comportemental différentiel. Les espèces les plus sensibles à la lumière, notamment les chauves-souris de type *Myotis* ou *Plecotus*, réduisent fortement leur présence dès qu'un lampadaire est allumé, quelle que soit sa couleur. Elles contournent largement la zone illuminée ou s'en tiennent à distance, ce qui traduit un effet-barrière immédiat. Même une faible intensité lumineuse suffit à dissuader ces espèces d'avancer dans la zone concernée, ce qui pose un problème important pour la continuité écologique des corridors. À l'inverse, des espèces réputées

Animal Conservation



Animal Conservation. Print ISSN 1367-9490

Manipulating spectra of artificial light affects movement patterns of bats along ecological corridors

K. Barré^{1,2}, I. Thomas^{1,2}, I. Le Viol^{1,2}, K. Spoelstra³ & C. Kerbiriou^{1,2}

¹ Centre d'Ecologie et des Sciences de la Conservation (CESCO), Muséum national d'Histoire naturelle, Centre National de la Recherche Scientifique, Sorbonne Université, Paris, France

² Centre d'Ecologie et des Sciences de la Conservation (CESCO), Muséum national d'Histoire naturelle, Station de Biologie Marine, Paris, France

³ Department of Animal Ecology, Netherlands Institute of Ecology (NIOO-KNAW), Wageningen, The Netherlands

Keywords

bat movement, Chiroptera, barrier effect, light behaviour, functional connectivity, streetlight crossing, artificial light, ecological corridors

Correspondence

Kévin Barré, Centre d'Ecologie et des Sciences de la Conservation (CESCO), Muséum national d'Histoire naturelle, Sorbonne Université, Cité 132, 75 rue Cuvier, 75005 Paris, France. Tel: +33 2 96 50 99 28. Email: kevin.berre@cnrs.fr

Kamal Spoelstra and Christian Kerbiriou share joint authorship on this work. Editor: Vincenzo Panerai. Associate Editor: Scott MacIvor

Received 21 November 2022; accepted 18 March 2023

doi:10.1111/acev.12876

Abstract

Animal movement throughout the landscape is a key concept for population viability. Human footprint can reduce animal movement through barrier effects such as habitat change and fragmentation, or through enhanced resources. Artificial light at night (ALAN) can affect the movement of nocturnal animals such as bats that are highly mobile in the landscape. Very few studies have explicitly quantified the choices that moving bats make when they encounter a light source such as a streetlight. We assessed whether ALAN of different colours (green, red and white) compared to control conditions affected the use of ecological corridors, considering (i) activity and (ii) movement along the corridor, for open, edge (i.e. light-opportunistic) and narrow-space (i.e. light-averse) foraging bats. We modelled the effects of 24 independent lamp-posts at four experimental sites on bat activity and movement (i.e. the number of trajectories towards the lampost and the probability of lampost crossing). Each lampost was sampled two to three times over eight complete nights using paired passive acoustic stereo recorders to record bat activity and reconstruct bat trajectories. Narrow-space foragers were more active towards any light source and more likely to cross a lampost, any light source. Open and edge-space foragers were more active close to white and green lights, and to a lesser extent red light, compared to control sites. Edge-space foragers overall flew more towards white and green lamposts, but had a lower probability of fully crossing a white and red-lighted site. The study shows that ALAN can strongly alter bat movements along landscape structures, for light-averse but also light-opportunistic species. Such changes in flight behaviour may involve bypasses or detours, which may force bats to fly longer distances at night which could ultimately affect fitness. Our findings suggest that avoiding artificial lighting close to flight routes will benefit bats.

Introduction

The ability of animals to move throughout the landscape is essential for individual fitness and hence population viability (e.g. Hanski & Ovaskainen, 2000; Allan, Keesing, & Ostfeld, 2003). For many species, mobility is essential for daily foraging or seasonal reproduction. Mobility influences biotic interactions (e.g. predator-prey relationships or competition for resources) and ecological services species can provide to ecosystems (e.g. pest regulation, seed dispersal, disease dispersal and gene flow) (e.g. Lundberg & Moberg, 2003; Blaauw & Hoye, 2014).

The degree to which landscape traits facilitate or impede individuals in their spatial behaviour, the so-called “functional connectivity”, is of crucial importance (Kindvall *et al.*, 2004; Jones *et al.*, 2014).

Artificial light at night (ALAN) used for human needs (e.g. street and road lighting for movements) is a global threat (Koen *et al.*, 2018) that can strongly affect the

Animal Conservation © 2023 The Authors. Animal Conservation published by John Wiley & Sons Ltd on behalf of Zoological Society of London. 1 This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution Licence, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

plus tolérantes, comme les pipistrelles ou certaines espèces d'espaces ouverts, réagissent différemment. En présence de lumière blanche et verte, elles augmentent leur activité près des lampadaires, attirées très probablement par les insectes qui s'y concentrent. Elles s'approchent donc volontiers des sources lumineuses, explorent la zone et parfois même chassent à proximité. La lumière rouge, souvent recommandée dans les aménagements pour sa moindre perturbation supposée, attire moins ces espèces, mais ne les dissuade pas totalement.

Cependant, un résultat majeur de l'étude apparaît lorsque l'on examine non pas la simple proximité des animaux avec la lampe, mais leur probabilité de traverser réellement la zone éclairée. Les espèces attirées ne franchissent pas pour autant la barrière lumineuse. Même les pipistrelles, pourtant très présentes autour des lampadaires, montrent une hésitation marquée lorsqu'il s'agit de traverser la zone lumineuse pour poursuivre leur trajet. Elles ralentissent, rebroussent chemin, ou s'engagent dans des détours imprévus, allongeant considérablement leur parcours. Cela signifie qu'un lampadaire peut jouer simultanément un rôle attractif (via la concentration d'insectes) et un rôle répulsif pour les déplacements (en créant une barrière lumineuse). La connectivité écologique se trouve ainsi compromise, non pas parce que les animaux disparaissent totalement de la zone, mais parce que leur déplacement n'est plus linéaire ni continu.

La lumière rouge, bien qu'un peu moins perturbatrice, ne résout pas le problème. Elle peut réduire légèrement l'attractivité ou l'intensité des réactions d'évitement, mais elle ne supprime pas l'effet-barrière. Les chauves-souris restent moins susceptibles de traverser une zone illuminée, même lorsque cette lumière est supposée « faiblement impactante ». L'idée que l'on pourrait simplement changer la couleur de la lumière pour « compenser » ses effets apparaît donc en grande partie illusoire à l'échelle des déplacements réels.

L'article insiste donc sur un point crucial : dans les corridors écologiques, la question centrale n'est pas seulement de limiter la mortalité directe ou la dérive comportementale, mais de préserver l'intégrité des routes de déplacement. Les chauves-souris utilisent ces corridors pour relier des zones de gîte, d'alimentation ou de reproduction. Tout obstacle qui ralentit, détourne ou fragmente ces trajets peut avoir des conséquences fonctionnelles sérieuses, en particulier pour les espèces les plus sensibles. Le coût énergétique accru, les risques accrus de préation ou les difficultés à atteindre les zones de chasse peuvent, à long terme, affecter la survie des populations locales.

En conclusion, l'étude montre que la manipulation du spectre lumineux n'est pas une solution suffisante pour maintenir la connectivité des milieux utilisés par les chauves-souris. Blanc, vert ou rouge, la lumière modifie les déplacements, et l'effet-barrière persiste, même lorsque les intensités lumineuses sont faibles et même pour des espèces considérées comme tolérantes. Les auteurs recommandent donc que la priorité, dans les corridors écologiques, soit de ne pas éclairer, ou de réduire drastiquement l'intensité, la durée et l'emprise spatiale de l'éclairage lorsque son installation est jugée indispensable.

* * *

*The effects of artificial light at night on behavioral rhythm and related gene expression are wavelength dependent in the oyster *Crassostrea gigas**

Les effets de la lumière artificielle nocturne sur le rythme comportemental et l'expression des gènes associés dépendent de la longueur d'onde chez l'huître *Crassostrea gigas*

Revue

Environmental Science and Pollution Research

Auteurs

A. Botté, L. Payton, & D. Tran

Institution d'affiliation du premier auteur

UMR CNRS 5805 EPOC Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux / Université de Bordeaux. Station Marine d'Arcachon, Place Peyneau, 33 120, Arcachon, France.

Résumé

L'article étudie de façon approfondie comment différentes couleurs de lumière artificielle nocturne perturbent les rythmes biologiques d'une espèce emblématique des zones côtières, l'huître *Crassostrea gigas*. Comme les littoraux sont fortement exposés à l'éclairage urbain et portuaire, les auteurs cherchent à déterminer quelles longueurs d'onde sont les plus dommageables pour les rythmes naturels de cette espèce, en particulier pour son cycle d'activité reposant sur l'ouverture et la fermeture des valves, véritable marqueur de son horloge interne. Des huîtres ont été exposées à des éclairages rouges, verts, bleus et blancs, tous calibrés à une intensité faible mais réaliste (1 lux). Le comportement quotidien des animaux a été enregistré en continu grâce à un dispositif de valvométrie très précis permettant de retracer les variations d'activité sur 24 heures. En parallèle, les auteurs ont examiné comment la lumière nocturne perturbait l'expression de gènes associés à l'horloge interne, à la perception de la lumière et à la régulation hormonale, sans chercher à détailler chaque mécanisme moléculaire mais en évaluant leur synchronisation globale.

Les résultats montrent que toutes les lumières nocturnes perturbent les rythmes journaliers, mais l'intensité de cette perturbation varie nettement selon la couleur. En condition naturelle (obscurité la nuit), les huîtres présentent un rythme bien marqué, avec une activité se concentrant le jour. Mais dès qu'une lumière est présente la nuit, ce rythme se désorganise : l'amplitude diminue, la régularité baisse et l'acrophase se décale. Avec la lumière bleue et, dans une moindre mesure, la lumière blanche, les effets sont particulièrement prononcés : une grande partie des individus voit son activité basculer vers la nuit, ce qui représente un renversement complet du rythme normal. La force du rythme diminue fortement, et la proportion d'animaux maintenant un cycle cohérent chute drastiquement.

Les éclairages rouges et surtout verts provoquent des perturbations moins marquées, même si le rythme n'est plus aussi clair et que certains individus perdent également leur

Environmental Science and Pollution Research
<https://doi.org/10.1007/s11356-023-30793-1>

RESEARCH ARTICLE



The effects of artificial light at night on behavioral rhythm and related gene expression are wavelength dependent in the oyster *Crassostrea gigas*

Audrey Botté¹ · Laura Payton¹ · Damien Tran¹ ◀

Received: 7 June 2023 / Accepted: 27 October 2023
 © The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2023

Abstract

Artificial light at night (ALAN) constitutes a growing threat to coastal ecosystems by altering natural light cycles, which could impair organisms' biological rhythms, with resulting physiological and ecological consequences. Coastal ecosystems are strongly exposed to ALAN, but its effects on coastal organisms are poorly studied. Besides ALAN's intensity, ALAN's quality exposure may change the impacts on organisms. This study aims to characterize the effects of different ALAN's spectral compositions (monochromatic wavelength lights in red (peak at 626 nm), green (peak at 515 nm), blue (peak at 467 nm), and white (410–580 nm) light) at low and realistic intensity (1 lx) on the oyster *Crassostrea gigas* daily rhythm. Results reveal that all ALAN's treatments affect the oysters' daily valve activity rhythm in different manners and the overall expression of the 13 studied genes. Eight of these genes are involved in the oyster's circadian clock, 2 are clock-associated genes, and 3 are light perception genes. The blue light has the most important effects on oysters' valve behavior and clock and clock-associated gene expression. Interestingly, red and green lights also show significant impacts on the daily rhythm, while the lowest impacts are with the green light. Finally, ALAN white light shows the same impact as the blue one in terms of loss of rhythmic oysters' percentage, but the chrono-ecological parameters of the remaining rhythmic oysters are less disrupted than when exposed to each of the monochromatic light's treatments alone. We conclude that ALAN's spectral composition does influence its effect on oysters' daily rhythm, which could give clues to limit physiological and ecological impacts on coastal environments.

Keywords ALAN · Light spectrum · *Crassostrea gigas* · Circadian clock · Daily rhythm · Oyster behavior · Valvometry

Introduction

ALAN is a worldwide phenomenon whose amplitude is still growing since its radiation increases each year (1.8% as well as lit areas (2.2%) (Falehi et al. 2016; Kyba et al. 2017). Despite some positive aspects for human activities (security, social activities, advertising, or aesthetics), nocturnal lighting constitutes a threat to public health and ecosystems by affecting organisms' physiology, behavior, communication, reproduction, or communities structure (Brayley et al. 2022; Sanders et al. 2021). To limit these harmful effects,

mitigation strategies have been suggested by varying lighting intensity, spectrum, or duration (Gaston 2018). The growing use of light-emitting diodes (LEDs) can facilitate the application of these strategies since their lighting characteristics (intensity, timing, spectrum) can be easily modulated compared to previous lighting technologies (Gaston 2018). Narrow white LED spectrum to contain only the wavelengths least harmful to organisms in a given environment could mitigate the increasing ALAN impacts caused by the widespread use of white LED, which are rich in short wavelengths (Kyba 2018; Longcore and Rich 2016).

The increase in blue-rich sources of ALAN is shown to make brighter the anthropogenic nocturnal skyglow and can be even more harmful to marine organisms since blue and green ones can penetrate deeper in seawater, depending on its composition (Falcon et al. 2020). Finally, blue wavelengths are more susceptible to affect organisms' physiology since they are used as signals in many biological processes,

Published online: 08 November 2023



Responsible Editor: Philippe Garrigues

✉ Damien Tran
 damien.tran@u-bordeaux.fr

¹ University of Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, EPOC,
 UMR 5805, 33120 Arcachon, France

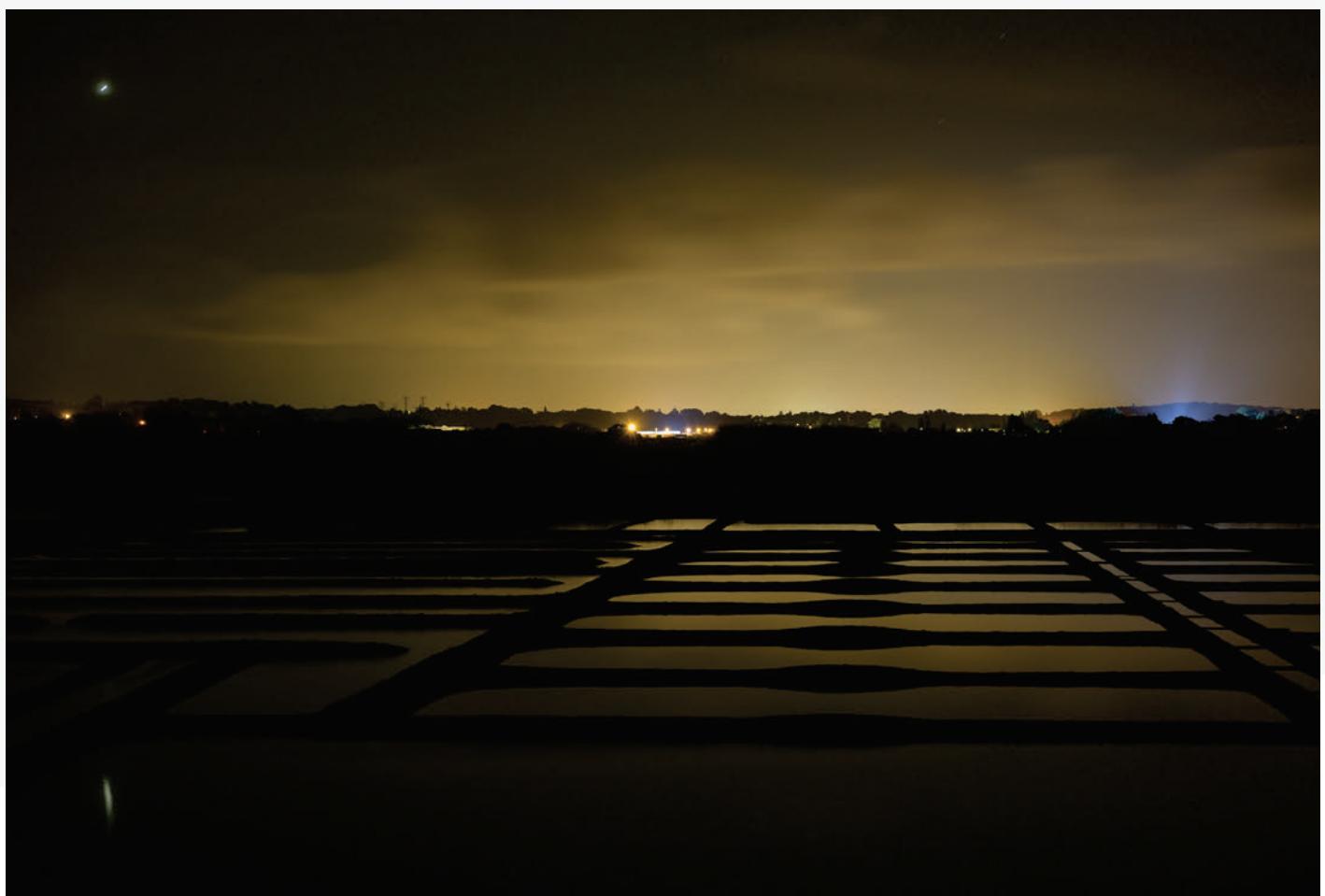
synchronisation. La lumière verte apparaît comme la moins perturbatrice dans ce contexte expérimental, ce qui est notable compte tenu du rôle prépondérant des longueurs d'onde bleues dans la désorganisation observée.

Sur le plan physiologique, la lumière nocturne entraîne aussi une désynchronisation globale de l'horloge interne : les cycles d'expression génétique associés à la régulation des rythmes jour/night s'atténuent voire disparaissent lorsque la lumière est présente la nuit, en particulier sous éclairage bleu et blanc. Autrement dit, la lumière artificielle empêche l'horloge biologique de fonctionner comme un oscillateur stable, ce qui peut avoir des répercussions sur de nombreuses fonctions essentielles (métabolisme, reproduction, croissance, résistance au stress).

L'étude montre donc clairement que la pollution lumineuse n'a pas seulement des effets comportementaux immédiats : elle s'attaque aussi aux mécanismes internes de synchronisation. Les auteurs en tirent une conclusion forte : toutes les lumières nocturnes ne se valent pas, et la composante bleue est de loin la plus perturbante pour *Crassostrea gigas*. À l'inverse, les longueurs d'onde vertes semblent beaucoup moins dommageables. Ces résultats suggèrent que les stratégies d'éclairage dans les zones littorales devraient intégrer la notion de spectre, et pas seulement l'intensité, afin de réduire l'impact sur les organismes marins.

En somme, l'article montre que *Crassostrea gigas* est hautement sensible à la lumière nocturne, que ses rythmes naturels peuvent être inversés ou effacés selon la couleur de l'éclairage, et que la gestion du spectre lumineux constitue un levier essentiel pour atténuer la pollution lumineuse dans les environnements côtiers.

* * *



Photographie : David Loose

The effects of light pollution on migratory animal behavior

Les effets de la pollution lumineuse sur le comportement des animaux migrateurs

Revue

Trends in Ecology & Evolution,
numéro spécial « Animal behaviour
in a changing world »

Auteurs

C.S. Burt, J.F. Kelly, G.E. Trankina, C.L. Silva, A. Khalighifar, H.C. Jenkins-Smith, A.S. Fox, K.M. Fristrup, & K.G. Horton.

Institution d'affiliation du premier auteur

Colorado State University, Department
of Fish, Wildlife, and Conservation
Biology, 1474 Campus Delivery,
Fort Collins, CO 80523, USA.

Résumé

La lumière artificielle éclaire toujours plus intensément nos nuits, et cette transformation rapide du monde nocturne bouleverse profondément la vie des animaux migrateurs. Depuis plus d'un siècle, les humains constatent que les oiseaux sont attirés par les faisceaux lumineux et se heurtent en masse aux phares, gratte-ciel et autres structures éclairées. Ce phénomène demeure aujourd'hui d'une ampleur considérable : on estime qu'un milliard d'oiseaux pourraient mourir chaque année de collisions amplifiées par la lumière. Mais les oiseaux ne sont pas seuls concernés. De nombreux insectes, chauves-souris, tortues marines, poissons ou mammifères voient leurs déplacements perturbés, parfois détournés, parfois retardés, parfois interrompus.

L'article rappelle que la lumière pose problème à plusieurs échelles. Autour des bâtiments ou des tours émettant une lumière intense, les animaux tournent en rond, désorientés, jusqu'à l'épuisement ou la collision. Dans certaines villes nord-américaines, des milliers de carcasses d'oiseaux sont retrouvées chaque année au pied des façades vitrées. Certaines sources lumineuses créent des "pièges écologiques" visibles de très loin : la lueur d'une métropole attire par exemple des nuées d'insectes ou de migrants en pleine nuit, modifiant radicalement leurs trajectoires régionales. À grande échelle, les couloirs migratoires eux-mêmes sont désormais traversés par des halos lumineux gigantesques, visibles à des centaines de kilomètres et capables d'altérer l'orientation, les altitudes de vol ou encore les périodes de départ et d'arrivée.

Contrairement à une idée répandue, la lumière artificielle n'affecte pas seulement les animaux qui voyagent la nuit. Chez certaines espèces qui migrent le jour, une simple exposition aux lumières urbaines, parfois lors des haltes nocturnes, suffit à modifier leur horloge interne : des oiseaux diurnes partent plus tôt en migration, des papillons monarques

Trends in Ecology & Evolution

Special issue: Animal behaviour in a changing world



The effects of light pollution on migratory animal behavior

Carolyn S. Burt,^{1,*} Jeffrey F. Kelly,^{2,3} Grace E. Trankina,² Carol L. Silva,⁴ Ali Khalighifar,¹ Hank C. Jenkins-Smith,⁴ Andrew S. Fox,¹ Kurt M. Fristrup,⁵ and Kyle G. Horton¹

Light pollution is a global threat to biodiversity, especially migratory organisms, some of which traverse hemispheric scales. Research on light pollution has grown significantly over the past decades, but our review of migratory organisms demonstrates gaps in our understanding, particularly beyond migratory birds. Research across spatial scales reveals the multifaceted effects of artificial light on migratory species, ranging from local and regional to macroscale impacts. These threats extend beyond species that are active at night – broadening the scope of this threat. Emerging tools for measuring light pollution and its impacts, as well as ecological forecasting techniques, present new pathways for conservation, including transdisciplinary approaches.

History and introduction to light pollution

For hundreds of years, and likely even millennia, humans have observed disruptions of animal behavior by light (e.g., fire) [1–4]. However, artificial light was only referenced as a pollutant in the early 1900s, and it was not until 1985 that the term 'photo pollution' was examined with reference to the effects of light on wildlife [5]. Yet, for decades light pollution (see [Glossary](#)) and similar terms primarily occupied studies of astronomy [6,7]. Eventually this term evolved, and [astronomical light pollution](#) was defined in relation to specific effects on the night-time viewing of celestial bodies. In 2004 Longcore and Rich set out to define light pollution with regard to ecology, coining the term [ecological light pollution](#). Their landmark review amplified the importance of studying the effects of light pollution on wildlife and the need to distinguish it from astronomical light pollution [8].

At the intersection of light pollution and ecology, some of the first examples of the impacts of artificial light, before the use of the term light pollution, date as far back as the late 1900s – many of these early observations relate to migratory animals, often birds. Events that were hard to miss often included the fatal collisions of birds with lit lighthouses, illuminated ships, oil platforms, and other prominent lit structures – yielding some of the most gripping and grave examples of these impacts [1,9–14]. The iconic Washington Monument, a 169 m marble obelisk that defines the night skyline of Washington DC, USA, remained dark on its 50th anniversary in 1955, including winter months [13]. The event occurred in just an hour and a half, during an average of 6.4 birds per minute. We can just forward 80 years in time and see that, amazingly, strikingly similar instances still occur. In the spring of 2017 nearly 400 birds were killed when they collided with a single brightly lit high-rise in Galveston, Texas, USA [15]. Again, in fall of 2021, 226 migratory birds were killed in window collisions near One World Trade Center in New York City, USA, sparking outcry [16].

Highlights

Awareness of light as a pollutant is growing, and with emerging technologies our understanding of how light pollution uniquely impacts migratory species across multiple scales, including continental, regional, and local scales, is possible. Predictive tools for measuring light pollution and its impacts, as well as ecological forecasting techniques, present new pathways for conservation, including transdisciplinary approaches.

Extruding and dimming lights is a first priority to reducing ecological impacts, but light can be modified when needed across multiple scales, including controlling temperature, including periodic color pulses. Responses to light color and intensity are not uniform across taxonomic groups.

Light pollution can affect nocturnal and diurnal annual migrants by disrupting diurnal and nocturnal cycles of various scales. Light pollution can affect local scales, as well as regional scales, with it affecting stopover sites and the serial connectivity of the night sky, and at macroscales through exposure to day and night artificial phenomena.

¹Colorado State University, Department of Fish, Wildlife, and Conservation Biology, 1474 Campus Delivery, Fort Collins, CO 80523, USA

²University of Oklahoma, Department of Biology, 100 West Brooks, Norman, OK 73019, USA

³University of Oklahoma, Oklahoma Biological Survey, 111 North University St., Norman, OK 73019, USA

⁴University of Oklahoma, Institute for Public Policy Research, 100 West Brooks, Norman, OK 73019, USA

⁵Colorado State University, Department of Electrical and Computer Engineering, 1520 Campus Delivery, Fort Collins, CO 80523, USA

*Correspondence:
Carly.Burt@colostate.edu (C.S. Burt).

Trends in Ecology & Evolution, April 2023, Vol. 28, No. 4, 355–365
https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.11.005
© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.

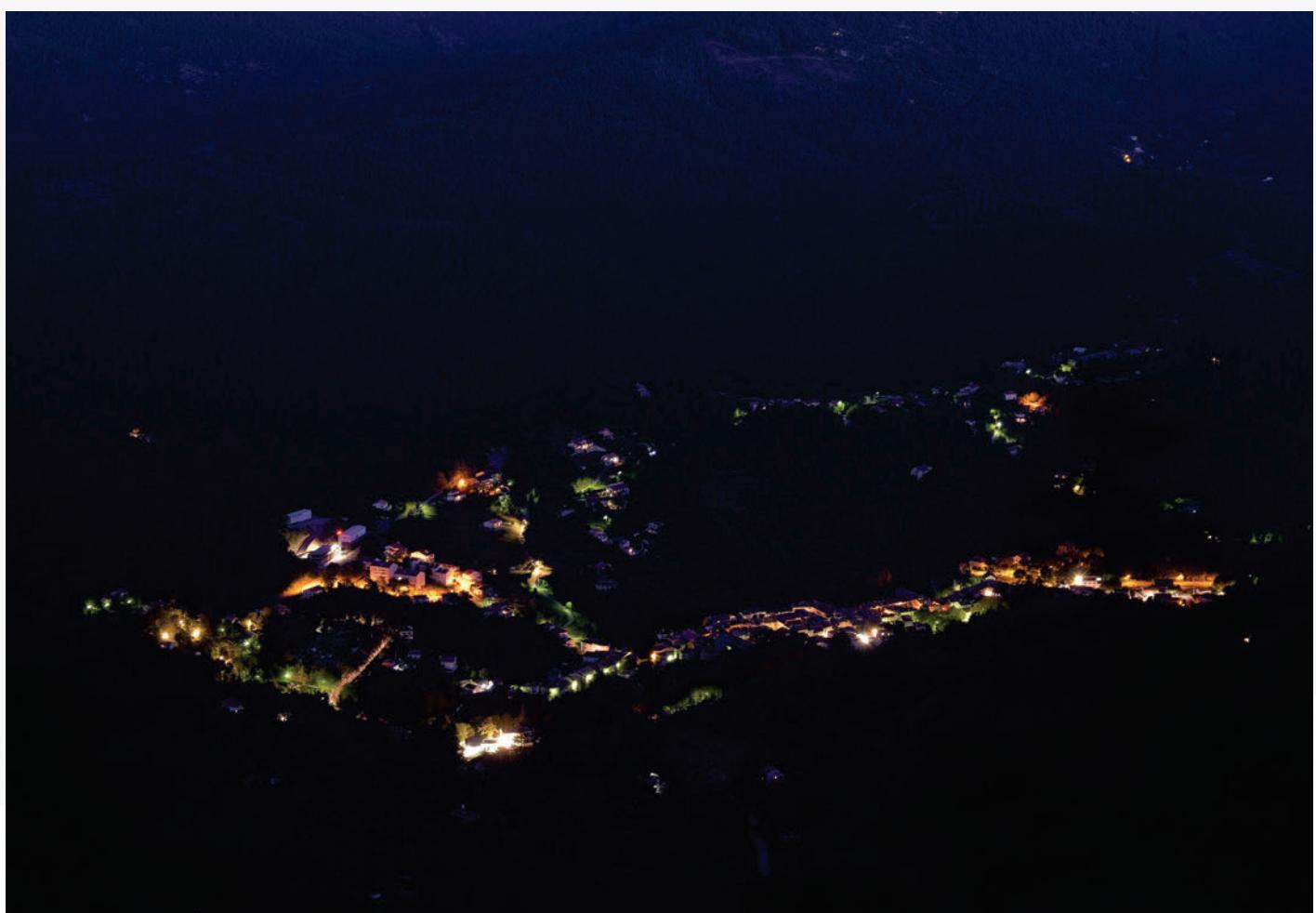
peuvent se mettre à voler la nuit, et les plantes dont ils dépendent lors de leur arrivée peuvent elles aussi voir leur calendrier décalé par la lumière nocturne.

Pour comprendre et mesurer ces effets, les chercheurs utilisent aujourd'hui des outils variés : capteurs de luminosité, caméras hémisphériques, spectromètres, satellites qui cartographient l'éclairement du globe nuit après nuit. Ces nouvelles techniques permettent aussi de développer des systèmes de prévision des migrations. Aux États-Unis et en Europe, des radars météorologiques sont utilisés pour anticiper les nuits où des millions d'oiseaux traverseront une région. Ces prévisions servent désormais à recommander l'extinction temporaire des lumières dans les zones les plus exposées.

Malgré les progrès, de grandes zones d'ombre subsistent : la majorité des études se concentre sur les oiseaux, et l'on sait encore peu de choses sur les conséquences physiologiques ou comportementales pour la plupart des autres espèces migratrices. Les chercheurs soulignent que la lumière artificielle interagit avec d'autres pressions majeures : pollution de l'air, bruit, artificialisation des milieux, changement climatique. Dans ce contexte, la lumière représente pourtant une rare forme de pollution dont l'atténuation peut être immédiate : il suffit d'éteindre, de réduire ou d'adapter l'éclairage.

L'article conclut que le défi n'est plus seulement scientifique. C'est un enjeu de société qui nécessite de nouvelles politiques publiques et une collaboration active entre chercheurs, collectivités, citoyens et décideurs. Comprendre comment traduire les connaissances scientifiques en actions concrètes est désormais aussi important que mesurer les effets mêmes de la lumière sur les migrations.

* * *



Photographie : David Loose

Artificial light at night (ALAN) causes shifts in soil communities and functions

L'éclairage artificiel nocturne entraîne des changements dans les communautés et les fonctions du sol

Revue

Philosophical Transactions of the Royal Society B (numéro thématique)

Auteurs

S. Cesár, N. Eisenhauer, S.F.
Bucher, M. Ciobanu, & J. Hines

Institution d'affiliation du premier auteur

German Centre for Integrative
Biodiversity Research (iDiv),
University of Leipzig Allemagne

Résumé

Lorsque l'on pense à la pollution lumineuse, on imagine surtout ses effets sur les insectes attirés par les lampadaires ou sur les oiseaux désorientés par les halos urbains. Pourtant, cette étude montre que la lumière artificielle peut transformer en profondeur un monde que l'on voit peu : le sol. Sous nos pieds vit une immense diversité d'organismes – micro-champignons, bactéries, nématodes, racines – qui jouent un rôle essentiel dans la fertilité des terres, la qualité de la végétation et le stockage du carbone. Jusqu'ici, personne n'avait vraiment mesuré comment la lumière nocturne modifie ce système invisible mais vital.

Les chercheurs ont mené une expérience très contrôlée dans douze grandes chambres expérimentales où lumière, température, arrosage et cycles lunaires pouvaient être pilotés précisément. Certaines chambres recevaient une lumière de nuit très faible, d'autres une lumière proche de celle d'un lampadaire de rue. Pendant quatre mois et demi, ils ont observé l'évolution des plantes, de l'humidité du sol, de l'activité microbienne et des communautés de nématodes, un groupe d'animaux microscopiques particulièrement révélateurs de la santé des sols.

Les premiers effets de la lumière apparaissent sur les plantes. Lors de la période de croissance maximale, les plantes exposées à un éclairage nocturne fort produisaient moins de biomasse, signe probable d'un stress physiologique ou d'une perturbation de leur rythme naturel de photosynthèse. Ce simple changement se répercute immédiatement dans le sol, car les plantes influencent l'humidité, la température et la quantité de nutriments envoyés par les racines. Le sol éclairé artificiellement devenait plus sec, réduisant l'activité microbienne et la respiration du sol, c'est-à-dire sa capacité à recycler le carbone. Pourtant, les microbes restaient aussi nombreux, mais semblaient fonctionner différemment : ils utilisaient le carbone de manière plus "économique", une réponse typique à un stress environnemental. Du côté des nématodes, les effets sont plus nets encore. Les organismes qui se nourrissent des plantes devenaient plus abondants sous lumière artificielle, comme si les plantes affaiblies offraient un terrain plus facile pour ces petits consommateurs. Les com-

PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS B

royalsocietypublishing.org/journal/rstb



Research

Cite this article: Cesár S, Eisenhauer N, Bucher SF, Ciobanu M, Hines J. 2023 Artificial light at night (ALAN) causes shifts in soil communities and functions. *Phil. Trans. R. Soc. B* 378: 20220366. <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0366>

Received: 29 March 2023
Accepted: 12 September 2023

One contribution of 17 to a theme issue 'Light pollution in complex ecological systems'.

Subject Areas:
ecology, ecosystems, environmental science

Keywords:
light pollution, biodiversity–ecosystem functioning, biotic invader, belowground

Author for correspondence:
Simone Cesár
e-mail: Simone.Cesar@idiv.de

Artificial light at night (ALAN) causes shifts in soil communities and functions

Simone Cesár^{1,2}, Nico Eisenhauer^{1,2}, Solveig Franziska Bucher^{1,3},

Marcel Ciobanu⁴ and Jes Hines^{1,2}

¹German Centre for Integrative Biodiversity Research (iDiv) Halle-Jena-Leipzig, 04103 Leipzig, Germany
²Institute of Biology, Leipzig University, Leipzig 04109, Germany
³Institute of Ecology and Evolution with Herbarium Hasskarl and Botanical Garden, Department of Plant Biodiversity, Friedrich Schiller University Jena, Jena 07743, Germany
⁴Institute of Biological Research, Branch of the National Institute of Research and Development for Biological Sciences, 48 Republicii Street, 00015 Cluj-Napoca, Romania

© SC 0000-0003-2314-5119; SFB 0000-0002-2301-4581

Artificial light at night (ALAN) is increasing worldwide, but its effects on the soil system have not yet been investigated. We tested the influence of experimental manipulation of ALAN on two taxa of soil communities (microorganisms and soil nematodes) and three aspects of soil functioning (soil basal respiration, soil microbial biomass and carbon use efficiency) over four and a half months in a highly controlled Ecotron facility. We show that during peak plant biomass, increasing ALAN reduced plant biomass and was also associated with decreased soil water content. This further reduced soil respiration under high ALAN at peak plant biomass, but microbial communities maintained stable biomass across different levels of ALAN and times, demonstrating higher microbial carbon use efficiency under high ALAN. While ALAN did not affect microbial community structure, the abundance of plant-feeding nematodes increased and there was homogenization of nematode communities under higher levels of ALAN, indicating that soil communities may be more vulnerable to additional disturbances at high ALAN. In summary, the effects of ALAN reach into the soil system by altering soil communities and ecosystem functioning, and these effects are mediated by changes in plant productivity and soil water content at peak plant biomass.

This article is part of the theme issue 'Light pollution in complex ecological systems'.

1. Introduction

Natural light, i.e. moon and sunlight, has been extremely consistent, with periodic recurring cycles over long periods of geological time. It is, therefore, a reliable environmental cue to which many biological systems are calibrated [1]. However, with the increasing amount of artificial light at night (ALAN), formerly consistent natural light cues are being disrupted, causing changes at multiple levels of organization [2]. Most previous studies examining the influence of ALAN have focused on the responses of aboveground animals, such as changes in abundance, life-history traits and physiology. So far, evidence showing ecosystem functions and plant-related responses to ALAN is still scarce [2]. Thereby, a comprehensive view of multiple types of responses and organizational levels is important in order to be able to evaluate the threats caused by ALAN [3,4].

Understandably, most ALAN studies focus on the responses of organisms and functions that are directly exposed to artificial light sources. Accordingly, responses of soil organisms have been excluded, despite their high biodiversity and importance for ecosystem functions such as nutrient cycling, carbon sequestration and decomposition [5–7]. Most studies on ALAN involving microorganisms—the main driver of the mentioned functions—are limited to

© 2023 The Authors. Published by the Royal Society under the terms of the Creative Commons Attribution License <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>, which permits unrestricted use, provided the original author and source are credited.

Electronic supplementary material is available
online at <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0364>.
c.085m0854.

THE ROYAL SOCIETY
PUBLISHING

munautés de nématodes exposées à de fortes lumières devenaient également plus homogènes : elles se ressemblaient davantage d'une chambre expérimentale à l'autre, signe d'une perte de diversité fonctionnelle. Or, des communautés trop uniformes rendent les écosystèmes plus vulnérables aux perturbations, qu'il s'agisse de sécheresses, de parasites ou d'autres pollutions. La lumière artificielle agit donc comme un agent d'homogénéisation écologique, un phénomène déjà identifié comme une menace majeure pour la stabilité des milieux naturels

Au fil des semaines, ces modifications se propagent en cascade : plantes affaiblies, sol plus sec, microbes moins actifs, faune du sol remodelée. Et tout cela sans que le sol soit directement éclairé : les effets passent par les plantes, les microclimats et les interactions complexes entre organismes. En quelques mois seulement, le fonctionnement du sol commence à changer, ce qui laisse penser que des effets plus marqués pourraient apparaître sur le long terme

L'étude montre qu'il ne s'agit pas d'un simple détail écologique. Le sol est au cœur de la régulation du climat, de la production alimentaire et de la santé des écosystèmes. Si la lumière artificielle de nuit peut modifier la façon dont il respire, se renouvelle et résiste aux pressions, alors la pollution lumineuse touche bien plus que les animaux visibles du dessus : elle altère les fondations mêmes des milieux terrestres. Les auteurs insistent sur le fait que ces effets viennent s'ajouter à d'autres pressions environnementales – sécheresse, pesticides, changement climatique – qui agissent en même temps. Dans ce contexte, réduire la lumière inutile, orienter mieux les éclairages, limiter leur durée ou protéger certaines zones devient un moyen simple et efficace de préserver une biodiversité discrète mais indispensable. En montrant que les écosystèmes souterrains réagissent vite et profondément à la lumière artificielle, cette recherche élargit notre compréhension de la pollution lumineuse : ce n'est pas seulement une nuisance pour la faune nocturne, mais une perturbation majeure qui traverse les écosystèmes de haut en bas, jusque dans les sols où se construit l'équilibre du vivant.



Photographie : David Loose

Why flying insects gather at artificial light

Pourquoi les insectes volants se rassemblent autour des lumières artificielles

Revue

Nature Communications

Auteurs

S.T. Fabian, Y. Sondhi, P.E. Allen,
J.C. Theobald, & H.-T. Lin

Institution d'affiliation du premier auteur

Department of Bioengineering,
Imperial College London, London,
SW7 2AZ, Royaume-Uni.

Résumé

Le rassemblement des insectes autour des lampes, des néons ou des feux de camp est si ancien et si universel qu'il a donné naissance à l'expression « attiré comme un papillon par la flamme ». Pourtant, malgré des siècles d'observations, la véritable raison de ce comportement étrange restait mal comprise. Ce nouvel article apporte une réponse claire grâce à un travail inédit : filmer et reconstruire en trois dimensions les trajectoires exactes d'insectes en vol, aussi bien en laboratoire qu'en pleine nature, à l'aide de caméras ultra-rapides et de systèmes de capture de mouvement capables de détecter le moindre battement d'aile.

Les résultats montrent que les insectes ne sont pas attirés vers les lampes comme on l'a longtemps cru. Ils ne volent presque jamais directement vers la source lumineuse. Au contraire, ils commencent à tourner autour, à monter brusquement, à se renverser ou à chuter, comme s'ils perdaient tout contrôle. Trois grands comportements se répètent dans les vidéos : l'« orbite », où l'insecte décrit des cercles serrés autour de la lampe ; le « décrochage », où il monte en piqué jusqu'à s'arrêter en l'air ; et l'« inversion », où il bascule sur le dos en passant au-dessus de la source lumineuse, avant de tomber. Ces motifs, visibles sur les trajectoires bleues superposées page 3 de l'article, sont pratiquement absents lorsqu'aucune lumière n'est allumée.

Pourquoi ces manœuvres étranges ? Les analyses montrent que les insectes tournent systématiquement le dos à la source lumineuse, comme si elle leur indiquait « le haut ». Ce réflexe ancestral, appelé *dorsal-light response*, fonctionne tant que la zone la plus lumineuse est le ciel. Mais près d'une lampe, ce repère devient brusquement très bas et très intense. L'insecte incline alors son corps vers la lumière : cette inclinaison déclenche mécaniquement un virage circulaire ou une ascension inefficace. Cette simple erreur d'interprétation suffit à expliquer l'ensemble des comportements observés, jusqu'aux chutes spectaculaires filmées au-dessus des lampes dirigées vers le sol (figure 4a).

Les expériences en laboratoire confirment ces observations. En fixant de minuscules marqueurs réfléchissants sur des libellules ou des papillons de nuit, les chercheurs mesurent

nature communications

6

Why flying insects gather at artificial light

Received: 6 March 2023

Samuel T. Fabian , Yash Sondhi , Pablo E. Allen⁴,

Accepted: 4 January 2024

Jamie C. Theobald^{2,6} & Huai-Ti Lin 

Published online: 30 January 2024



Explanations of why nocturnal insects fly erratically around fires and lamps have included theories of "lunar navigation" and "escape to the light". However, without three-dimensional flight data to test them rigorously, the cause for this odd behaviour has remained unsolved. We employed high-resolution motion capture in the laboratory and stereo-videoanalysis in the field to reconstruct the 3D kinematics of insect flights around artificial lights. Contrary to the expectation of attraction, insects do not steer directly toward the light. Instead, insects turn their dorsum toward the light, generating flight paths perpendicular to the source. Under natural sky light, tilting the dorsum towards the brightest visual hemisphere helps maintain proper flight attitude and control. Near artificial sources, however, this highly conserved dorsal-light-response can produce continuous steering around the light and trap an insect. Our guidance model demonstrates that this dorsal tilting is sufficient to create the seemingly erratic flight paths of insects near lights and is the most plausible model for why flying insects gather at artificial lights.

The interaction between flying insects and artificial light, is such a common occurrence that it has inspired the saying "drawn like a moth to a flame". The first recorded instance of this behaviour is with the earliest written records dating back to the Roman Empire around 1 AD¹. Efforts to improve light trap efficiency have generated many observations about nocturnal phototaxis, including phenomenological data on the effects of wavelength, the moon, sky brightness, and weather^{2,3}. Consequently, several qualitative models of how insects gather at light have been proposed⁴. Some of the most common theories include (1) insects are drawn to light through an escape mechanism, directing their flight toward it as they might run for a gap in the foliage⁵; (2) insects use the moon as a celestial compass cue to navigate, and mistakenly use artificial light sources instead⁶; (3) thermal radiation from light sources is attractive to flying insects⁷; (4) The sensitive night-adapted eyes of insects are blinded by artificial lights, causing them to fly erratically or crash, and trapping them near light sources^{8,9}. Understanding how insects interact with artificial light is particularly important amid modern increases in light pollution that are a growing contributor to insect declines^{10,11}.

Compared to the abundance of hypotheses, the kinematic data required to test these predictions are relatively rare¹². The thermal radiation theory has not yet been fully tested, while other models continue to be proposed today¹³. What has a conclusive answer evaded in? In part, because 3D tracking of small flying objects in low light is technically challenging, and necessary tools did not exist¹⁴. That did not stop researchers from attempting innovative experiments, such as attaching moths to polystyrene boats¹⁵. However, in-flight 3D flight trajectory and orientation measurements have remained difficult due to the lack of appropriate camera hardware and tracking software to consider the sensory requirements for insect flight control, and how artificial light may disrupt them.

Flying animals need a reliable way to determine their orientation with respect to the external world, especially with reference to the direction of gravity. Throughout the long evolutionary history of insect flight, the brightest part of the visual field has been the sky, and thus it is a robust indicator of which way is up. This is true even at night, especially at short wavelengths (<450 nm)¹⁶. Most flying insects display some form of the dorsal-light-response (DLR), a behaviour that keeps their dorsal (top) side to the brightest visual region¹⁷. This has been

¹Department of Bioengineering, Imperial College London, London SW7 2AZ, UK. ²Institute for Environment, Department of Biology, Florida International University, Miami, FL 33174, USA. ³McGuire Center for Lepidoptera and Biodiversity, Florida Museum of Natural History, University of Florida, Gainesville, FL 32611, USA. ⁴Council on International Educational Exchange, Monteverde Apto 43-5635, Costa Rica. ⁵These authors contributed equally: Samuel T. Fabian, Yash Sondhi. ⁶These authors jointly supervised this work: Jamie Theobald, Huai-Ti Lin. ⁷e-mail: s.fabien@imperial.ac.uk; yashsondi@gmail.com

Nature Communications | (2024)15:689

1

chaque angle du corps en vol. Les graphiques de la figure 3 montrent que la direction du dos correspond quasiment à l'axe de la lumière à un rapport de 1 pour 1. Autrement dit, les insectes ne visent pas la lampe : ils essaient simplement de garder leur dos face à elle. Sous un éclairage diffus se rapprochant du ciel naturel, ce comportement cesse immédiatement, et les insectes volent normalement. Même les plus petits insectes, testés dans un cube transparent éclairé par le dessus ou par le dessous, confirment ce mécanisme : avec la lumière au-dessus, ils s'élèvent de manière régulière ; avec la lumière en dessous, ils se renversent et sécrasent. Seules quelques espèces — certaines drosophiles ou un sphinx particulier — semblent échapper à cette règle, pour des raisons encore inconnues.

Les scientifiques ont ensuite créé un modèle informatique basé uniquement sur cette inclinaison réflexe vers la lumière. Les simulations génèrent exactement les mêmes trajectoires erratiques : orbites, inversions, chutes. Même sans ajustement fin, un simple contrôle automatique orienté par la lumière suffit pour que l'agent numérique reste piégé autour du point lumineux, comme on le voit sur les diagrammes colorés de la figure 6. Aucune autre hypothèse classique ne reproduit ces motifs : ni l'idée d'un « phare » vers lequel les insectes fuiraient, ni celle d'une confusion avec la lune, ni même l'aveuglement par la lumière.

Cette étude renverse ainsi l'explication historique du comportement des insectes autour des lampes. Ils ne sont pas irrésistiblement attirés ; ils sont désorientés. Leur cerveau interprète la lumière artificielle comme un repère vertical, ce qui perturbe tout leur système de stabilisation. Plutôt que de s'échapper, ils tournent en boucle ou s'effondrent faute de pouvoir retrouver la bonne orientation. À une distance plus élevée, d'autres mécanismes peuvent jouer, mais à proximité immédiate, l'effet de basculement dorsal explique l'essentiel.

Ces résultats ont des implications importantes. Ils montrent qu'un simple lampadaire, en particulier s'il émet des UV ou de la lumière froide, peut déclencher une cascade de comportements dangereux pour une multitude d'espèces, de la libellule au papillon de nuit. Ils indiquent aussi comment réduire ces perturbations : éviter les sources ponctuelles non diffusées, orienter les lumières vers le bas, limiter les longueurs d'onde problématiques ou réduire les surfaces réfléchissantes au sol. En résumé, protéger les insectes implique de limiter l'emprise du faux « ciel » que nos lampes créent dans la nuit.



Photographie : Samuel Challéat

Artificial light at night is a top predictor of bird migration stopover density

La lumière artificielle nocturne est l'un des meilleurs prédicteurs de la densité de halte migratoire des oiseaux

Revue

Nature Communications

Auteurs

K.G. Horton, J.J. Buler, S.J. Anderson, C.S. Burt, A.C. Collins, A.M. Dokter, F. Guo, D. Sheldon, M. Anna Tomaszewska, & G.M. Henebry

Institution d'affiliation du premier auteur

Department of Fish, Wildlife, and Conservation Biology, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA.

Résumé

Chaque année, des milliards d'oiseaux migrateurs traversent l'Amérique du Nord en volant de nuit et en faisant escale de jour pour se reposer, se nourrir et éviter les conditions météorologiques défavorables. Jusqu'ici, les scientifiques savaient que certaines régions concentraient plus d'oiseaux en halte que d'autres, mais ils manquaient d'une vision d'ensemble : il n'existe aucune carte complète montrant, à l'échelle des États-Unis, où et pourquoi les oiseaux s'arrêtent pendant leurs migrations saisonnières. L'étude présentée comble cette lacune en exploitant plus de dix millions d'observations issues des radars météorologiques, combinées à une batterie impressionnante de données environnementales, climatiques et d'imagerie satellite. Cette approche permet de cartographier avec une finesse inégalée les points chauds de halte migratoire au printemps et en automne.

Les auteurs montrent que les zones de halte ne sont pas réparties au hasard : elles forment un vaste réseau de « pas japonais » écologiques que les oiseaux utilisent comme autant d'étapes indispensables. Dans ce réseau, la structure des paysages joue un rôle déterminant : les forêts, les zones humides et, plus largement, les habitats végétalisés ressortent comme des facteurs majeurs expliquant pourquoi certaines zones accueillent de fortes densités de migrants. Les analyses révèlent que la couverture forestière — mesurée via différents indices (canopée, types de forêts, complexité structurelle) — est l'un des prédicteurs les plus réguliers et les plus puissants des haltes.

Mais l'un des résultats les plus marquants, et sans doute le plus surprenant, est la place qu'occupe la pollution lumineuse. Dans plus de 70 % des modèles saisonniers, les halos lumineux (le *skyglow*, c'est-à-dire l'éclairage diffus visible dans le ciel des zones urbaines) figurent parmi les prédicteurs les plus influents de la densité de halte. Non seulement la lumière artificielle nocturne est associée à une densité accrue d'oiseaux en escale, mais cette association est remarquablement constante entre saisons et régions. En d'autres

nature communications



Article

<https://doi.org/10.1038/s41467-023-43046-z>

Artificial light at night is a top predictor of bird migration stopover density

Received: 1 April 2023

Accepted: 30 October 2023

Published online: 04 December 2023

Check for updates

Kyle G. Horton ¹, Jeffrey J. Buler ², Sharolyn J. Anderson ³, Carolyn S. Burt ⁴, Amy C. Collins ^{4,5}, Adriana M. Dokter ⁶, Fengyi Guo ⁸, Daniel Sheldon ⁷, Monika Anna Tomaszewska ⁹ & Geoffrey M. Henebry ¹⁰

As billions of nocturnal avian migrants traverse North America, twice a year they must contend with landscape changes driven by natural and anthropogenic forces. Including the rapid growth of the artificial glow of the night sky. While airspaces facilitate migrant passage, terrestrial landscapes serve as essential areas to restore energy reserves and often act as refugia—making it critical to holistically identify stopover locations and understand drivers of use. Here, we leverage over 10 million remote sensing observations to develop seasonal contiguous United States layers of bird migrant stopover density. In over 70% of our models, we identify skyglow as a highly influential and consistently positive predictor of bird migration stopover density across the United States. This finding points to the potential of an expanding threat to avian migrants: peri-urban illuminated areas may act as ecological traps at macroscales that increase the mortality of birds during migration.

Avian migration represents an intrinsic linkage between diverse systems. While active migrants move in aerial spaces, terrestrial and aquatic systems provide resources for migrants to refuel and, offer a respite from adverse weather conditions. Use of these habitats, whether on land or in the air is anything but random, with some areas showing greater and more consistent use season-after-season, decade-after-decade. An objective and comprehensive understanding of the drivers of migrant activity at the interface of terrestrial and aerial habitats can have wide-ranging ecological and conservation implications, yet large-scale datasets are currently absent. To this end, we leverage remote sensing data and geospatial tools to quantify avian migrant stopover density across the contiguous United States for spring and fall.

The North American avian migration system is composed of nearly 500 migratory species. Migrants are primarily songbirds from both density and species richness perspectives*. Among songbirds, diversity in behavior abounds, including migration phenologies, foraging preferences, and tolerance to anthropogenic change. With species ranging from warbler to vireo to warblers to vireos, among others, comprehensive and large-scale samples can be remarkably challenging, especially for songbirds. We currently have a poor understanding of songbird stopover use because of their broad-front migration strategy that relies on a distributed patchwork of stopover habitat that covers the entire continental land mass. While community science datasets can capture migrant richness* and broad-scale stopover locations, they are often limited by spatial sampling biases. Some of these biases can be accounted for statistically; however, it still remains a challenge to quantify active migration to understand migrant turnover. Additionally, with the vast majority of migrants taking flight at night*, active migration can be challenging to observe visually. Here, the use of weather surveillance radar remote sensing data can inform our understanding of migrant

*Department of Fish, Wildlife, and Conservation Biology, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA. ¹Department of Entomology and Wildlife Ecology, University of Delaware, Newark, Delaware, USA. ²Natural Sounds and Night Skies Division, National Park Service, 1201 Oakridge Dr., Suite 100, Fort Collins, CO 80523, USA. ³Conservation Science Partners, Truckee, CA, USA. ⁴Cornell Lab of Ornithology, Cornell University, Ithaca, New York, USA. ⁵Department of Ecology and Evolutionary Biology, Princeton University, Princeton, New Jersey, USA. ⁶Meining College of Information and Computer Sciences, University of Massachusetts Amherst, Amherst, Massachusetts, USA. ⁷Center for Global Change and Earth Observations, Michigan State University, East Lansing, Michigan, USA. ⁸Department of Geography, Environment, and Spatial Sciences, Michigan State University, East Lansing, Michigan, USA. ⁹e-mail: kyle.horton@colostate.edu

Nature Communications | (2023)4:7446

1

termes, partout ou presque, les zones éclairées attirent davantage de migrants se posant durant la nuit ou au petit matin.

L'article met en garde contre une lecture trop optimiste de ce phénomène. Si certaines villes se trouvent effectivement à proximité d'habitats riches en ressources, d'autres zones éclairées n'offrent pas les conditions nécessaires pour un repos sûr ou un bon ravitaillement. Les oiseaux peuvent ainsi être attirés vers des régions où ils risquent davantage de collisions avec des bâtiments (une menace largement documentée), où les ressources alimentaires sont insuffisantes, ou encore où les perturbations anthropiques sont trop fortes. Les auteurs évoquent alors la possibilité de « pièges écologiques » créés à grande échelle, rendant certaines zones lumineuses particulièrement dangereuses en période migratoire.

Les cartes issues de l'étude montrent de fortes différences saisonnières. Au printemps, les densités d'oiseaux sont majoritairement concentrées dans la partie centrale des États-Unis, notamment au Texas, en Louisiane, en Oklahoma et en Arkansas. À l'automne, elles se déplacent vers le sud-est, avec des intensités particulièrement marquées en Alabama, en Géorgie et dans le Tennessee. Ce glissement géographique correspond aux grandes boucles migratoires suivies par de nombreuses espèces, qui ne reviennent pas par les mêmes trajets qu'à l'aller.

Les analyses montrent également que la densité de halte est globalement plus élevée à l'automne : plus de 70 % des pixels étudiés affichent des densités supérieures en automne qu'au printemps. Dans certains secteurs du pays, elle double même entre les deux saisons. Cette asymétrie saisonnière reflète le fait que la migration automnale implique souvent davantage d'oiseaux — adultes ayant réussi la reproduction, jeunes de l'année, et espèces partant parfois plus tardivement.

Pour comprendre ce qui détermine l'arrêt des oiseaux, les auteurs ont intégré près d'une cinquantaine de variables : végétation, couverture du sol, précipitations, température, altitude, humidité, structure forestière, distance au radar... et lumière nocturne. Grâce à des modèles d'apprentissage automatique, ils ont pu mesurer l'importance relative de chaque variable. Les graphiques en pages 2 à 4 de l'article montrent que l'altitude, les précipitations, la présence de forêts et surtout le *skylow* dominent largement. À l'inverse, les zones très agricoles et les espaces très ouverts sont associés à une moindre densité de halte.

En révélant que la lumière artificielle nocturne est un déterminant aussi fort des haltes migratoires, cette étude souligne un enjeu majeur : la migration, déjà rendue périlleuse par le changement climatique, la fragmentation des habitats et la préation, est désormais aussi perturbée par l'urbanisation lumineuse. Comme les halos urbains augmentent encore d'environ 10 % par an en Amérique du Nord, les chercheurs alertent sur une menace croissante. Réduire, orienter différemment ou adapter l'éclairage pourrait donc constituer un levier de conservation immédiat pour améliorer la sécurité des oiseaux migrants à l'échelle continentale.

En proposant les premières cartes continues des haltes migratoires pour les saisons de printemps et d'automne, l'étude fournit un outil de gestion inédit. Ces données permettent d'identifier les zones les plus cruciales pour la survie des migrants, de cibler des actions de protection, mais aussi d'anticiper les risques liés à l'éclairage urbain. Elles constituent une avancée majeure pour la conservation, illustrant de façon frappante la manière dont la lumière — une pollution souvent négligée — est en train de redessiner les routes migratoires du continent américain.

* * *

Effects of anthropogenic light on species and ecosystems

Effets de la lumière d'origine humaine sur les espèces et les écosystèmes

Revue

Science (numéro thématique)

Auteurs

A.K. Jägerbrand, & K. Spoelstra

Institution d'affiliation du premier auteur

Department of Electrical Engineering, Mathematics and Science, Faculty of Engineering and Sustainable Development, University of Gävle, 801 76 Gävle, Suède.

Résumé

La lumière artificielle fait aujourd’hui partie de presque tous les lieux où vivent des humains, et son intensité ne cesse d’augmenter à l’échelle mondiale. Cet article de synthèse montre que cette transformation lumineuse planétaire bouleverse profondément les espèces et les écosystèmes. La nuit naturelle, longtemps stable et prévisible, est désormais remplacée par une mosaïque de halos urbains, de routes éclairées, de façades illuminées et de lumières qui s’infiltrent jusque dans les zones les plus reculées. Les illustrations de la page 1, qui comparent un paysage pré-industriel, l’Anthropocène actuel et deux futurs possibles, résument bien l’ampleur du basculement : là où régnait une obscurité presque totale, une multitude de faisceaux et de lueurs attire, repousse ou désoriente oiseaux, insectes et chauves-souris.

Les oiseaux comptent parmi les espèces les plus touchées. Beaucoup migrent de nuit et utilisent le ciel comme repère. L’article rappelle que, dans les zones sombres, même un unique point lumineux peut attirer des milliers d’individus. En mer, les jeunes pétrels ou puffins séchouent en masse autour des villes littorales. Sur terre, les oiseaux sont désorientés par les gratte-ciel éclairés, les éclairages puissants d’infrastructures ou les projections lumineuses commémoratives, entraînant collisions, épuisement ou détournement de leurs routes migratoires. L’exposition à la lumière peut aussi dérégler leurs rythmes : avancement du chant matinal, stress accru, perturbation du sommeil, reproduction déclenchée trop tôt – des effets illustrés dans le schéma de la page 3 montrant comment la lumière du soir allonge artificiellement la « journée » des oiseaux.

Chez les mammifères, les réponses sont tout aussi variées. Les chauves-souris, très sensibles à la prédation, évitent souvent les zones éclairées, ce qui fragmente leurs corridors de déplacement, comme les lisières forestières ou les berges de rivières qu’elles utilisent habituellement pour se guider. Certaines espèces plus agiles profitent toutefois de l’accumulation d’insectes près des lampadaires. Les rongeurs et d’autres mammifères nocturnes, eux, réduisent leurs activités sous la lumière, comme ils le font lors des pleines lunes, ce qui modifie leurs comportements alimentaires, leur reproduction ou leurs déplacements.

Les insectes, quant à eux, sont peut-être les plus visiblement affectés. Comme l’explique la page 2, ils peuvent être attirés par des intensités lumineuses très faibles, surtout par

SPECIAL SECTION **LIGHT POLLUTION**

REVIEW

Effects of anthropogenic light on species and ecosystems

Anniko K. Jägerbrand¹ and Koen Spoelstra²

Anthropogenic light is ubiquitous in areas where humans are present and is showing a progressive increase worldwide. This has far-reaching consequences for most species and their ecosystems. The effects of anthropogenic light on natural ecosystems are highly variable and complex. Many species suffer from adverse effects, but others benefit. The effects of anthropogenic light on species and ecosystems become complicated because these can depend on the type of behavior and specific locations. Here we considered how solutions and new technologies could reduce the adverse effects of anthropogenic light. A simple solution to reducing and mitigating the ecological effects of anthropogenic light seems unattainable, because frugal lighting practices and turning off lights may be necessary to eliminate them.

Artificial light is ubiquitous in areas where humans are present and is showing a progressive increase worldwide. This has far-reaching consequences for most species and their ecosystems. The ability of mankind to produce and use light has enabled us to greatly disrupt species’ natural cycles and darkness and extend our activities into the night. However, artificial light has serious side effects that are commonly referred to as light pollution. Light pollution is defined as the sum total of all of the adverse effects of artificial light (hereafter referred to as anthropogenic light) (1). Ecological light pollution was originally defined as artificial light that alters the natural patterns of light and dark in ecosystems (2) that are caused by ecosystems to attract and distract light. As our society brightens, artificial light has become a global reality, affecting most of the world’s economically developed areas (3). Sky brightness has increased over time, enduing natural darkness and encroaching on protected terrestrial and marine areas. Anthropogenic light not only impacts on night vision through eye fatigue, but also poses serious challenges across species and ecosystems (4).

Over the past 15 years, there has been a substantial amount of research on the ecologic effects of anthropogenic light. This has increased awareness about this environmental problem. Commonly recommended solutions to mitigate the ecological effects of anthropogenic light include reductions or adaptations in light intensity, distribution, timing, and duration. New technologies such as light-emitting diodes (LEDs), can aid in reducing the effects of anthropogenic light on the natural environment. However, these solutions have limitations and may not safeguard against deleterious effects on all species.

Herein, we review the ways in which anthropogenic light affects species and ecosystems, discuss the research progress made in recent years, and describe various light pollution management solutions.

Fig. 1. Anthropogenic light through history and possible futures. (A) During the preindustrial era, fire light sources were used for outdoor activities during darkness. Natural light sources dominated the natural environment, bats foraged and roosted along forest edges, migrating birds were undisturbed by strong light sources, and there was no sky glow from cities. (B) In the Anthropocene, anthropogenic lighting is increasing and poses serious challenges across species and ecosystems. (C) As anthropogenic lighting is increasingly used, light pollution will also increase and result in higher mortality in insects and migrating birds, habitat loss for light-repelled bats, and increased foraging opportunities for synanthropic bats. Barrier effects and fragmentation of dark ecosystems will decrease habitat quality. (D) A well-managed future conserves dark areas and limits light use in several ways, thereby minimizing the effects of anthropogenic light on birds, insects, and bats and numerous other species.

Jägerbrand et al., *Science* **380**, 1125–1130 (2023). 16 June 2023

3 of 6

les composantes bleues des LED modernes. Leur vol en spirale autour des lampes peut entraîner épuisement, mortalité ou incapacité à se reproduire. Certaines espèces bioluminescentes, comme les lucioles, perdent leurs signaux de communication, ce qui réduit fortement le succès de reproduction. De nombreuses études montrent également que l'éclairage nocturne perturbe le développement des chenilles, modifie les communautés d'invertébrés ou empêche certaines espèces d'utiliser les repères lumineux naturels comme la polarisation de la lumière lunaire.

Les amphibiens et reptiles sont également touchés. Chez les crapauds, la lumière peut réduire l'activité, modifier les appels nuptiaux ou diminuer la fertilisation des œufs. Les tortues marines, dont les jeunes se dirigent normalement vers le horizon lumineux de la mer, se perdent facilement dans la clarté artificielle des hôtels ou des routes côtières. À l'inverse, certains reptiles diurnes, comme certains geckos ou anolis, tirent parti de la lumière artificielle pour chasser la nuit, bouleversant ainsi les rythmes habituels du milieu.

L'article consacre aussi une place importante aux milieux aquatiques. L'eau réfléchit fortement la lumière, ce qui amplifie sa propagation sur de grandes distances, comme autour des ports, des ponts ou des plateformes offshore. Les poissons peuvent alors être attirés, repoussés ou perturbés selon les espèces. Leur comportement alimentaire, leurs migrations, leur dépense énergétique et même le succès d'éclosion peuvent être modifiés par des intensités lumineuses faibles, bien inférieures à ce que perçoivent les humains.

Au-delà des espèces prises individuellement, la lumière modifie aussi les interactions écologiques. Elle peut favoriser certains prédateurs – par exemple les chauves-souris opportunistes ou les chouettes qui chassent plus facilement sous la lumière diffuse des villes. Les proies, elles, se déplacent différemment, évitent des zones pourtant favorables ou changent leurs horaires d'activité. La pollinisation nocturne, illustrée à la page 4, diminue fortement, obligeant les polliniseurs diurnes à compenser. Ces effets en cascade modifient les réseaux trophiques et, à terme, les services écosystémiques.

Enfin, l'article explore les solutions. Les schémas de la page 5 présentent différents types d'éclairages (routiers, architecturaux, décoratifs, ponts, *skylow*) et les mesures possibles : réduire la lumière inutile, limiter les émissions vers le haut, utiliser des optiques mieux dirigées, tamiser ou éteindre à certaines heures, adapter l'intensité en temps réel, ou choisir des spectres moins perturbants. Les auteurs insistent toutefois sur les limites des technologies actuelles : même les LED réglables continuent de produire du bleu, et même un éclairage parfaitement orienté finit par se réfléchir sur les surfaces. Surtout, il existe peu de seuils universels permettant de protéger l'ensemble des espèces, tant leurs sensibilités diffèrent.

Le texte conclut qu'aucune solution simple ne suffira. L'augmentation continue de la lumière artificielle, montrée dans les projections de la page 1, pourrait entraîner des déclins d'insectes toujours plus marqués, une fragmentation accrue des habitats nocturnes et des perturbations profondes des cycles biologiques. Pour limiter ces effets, il devient indispensable de restaurer des zones réellement sombres, de repenser entièrement les usages de la lumière, et dans certains cas, de réapprendre à éteindre. La sobriété lumineuse apparaît alors non seulement comme une mesure écologique, mais comme une nécessité pour préserver une partie fondamentale, mais fragile, du monde vivant.

Characterising diel activity patterns to design conservation measures: Case study of European bat species

Caractériser les rythmes d'activité quotidienne pour concevoir des mesures de conservation : étude de cas sur les chauves-souris européennes

Revue

Biological Conservation

Auteurs

L. Mariton, I. Le Viol, Y. Bas, & C. Kerbiriou

Institution d'affiliation du premier auteur

Centre d'Écologie et des Sciences de la Conservation (CESCO), Muséum national d'Histoire naturelle, CNRS, Sorbonne Université, CP 135, 57 rue Cuvier, 75 005 Paris ; Station de Biologie Marine, 1 place de la Croix, 29 900 Concarneau, France ; Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie (IMPMC), Sorbonne Université, CNRS, MNHN, IRD, 61 rue Buffon, 75 005 Paris, France

Résumé

Les chauves-souris sont des animaux entièrement dépendants de la nuit pour chasser, se déplacer et communiquer. Pourtant, si leurs habitats et leurs routes de vol sont relativement bien connus, leurs rythmes d'activité au cours de la nuit restent bien moins étudiés. Cet article repose sur une démarche scientifique rare par son ampleur : plus de 9800 nuits d'enregistrement acoustique réparties sur 4409 sites partout en France, collectées grâce à un vaste programme de sciences participatives. Cette base de données exceptionnelle a permis aux chercheurs de décrire finement l'heure à laquelle chaque espèce commence à sortir, devient la plus active ou termine sa nuit, et d'observer comment ces rythmes varient au fil des saisons.

L'analyse révèle d'abord que les espèces de chauves-souris ne se ressemblent pas toutes dans leur façon d'utiliser la nuit. En étudiant les milliers de « passes » (séquences d'appels ultrasonores) enregistrées, les auteurs montrent que certaines espèces ont une forte activité juste après le coucher du soleil, puis présentent un second pic juste avant l'aube. D'autres attendent que l'obscurité soit totale pour émerger, avec une activité plus étalée et moins marquée. Les représentations graphiques de l'article, notamment celles de la page 5, illustrent ces différences : les courbes d'activité des noctules (*Nyctalus noctula*) dessinent deux bosses très nettes au début et à la fin de la nuit, tandis que le murin à moustaches ou le grand rhinolophe montrent une activité beaucoup plus uniforme.

En croisant ces formes d'activité, les chercheurs distinguent trois grands groupes fonctionnels. Le premier regroupe les espèces « crépusculaires », actives dès que la lumière décline, souvent rapides et agiles, capables de voler en terrain dégagé et donc moins exposées à la préation. Viennent ensuite les espèces « tardives », à l'activité étalée mais débutant bien plus tard, souvent adeptes de milieux clos, de vols lents et précis, et sensibles à la lumière.

Biological Conservation 277 (2023) 109852

Contents lists available at ScienceDirect

Biological Conservation

journal homepage: www.elsevier.com/locate/biocon

Characterising diel activity patterns to design conservation measures: Case study of European bat species

Léa Mariton^{a,b,*}, Isabelle Le Viol^{a,b}, Yves Bas^{a,c,d}, Christian Kerbiriou^{a,b}

^a Centre d'Ecologie et des Sciences de la Conservation (CECS), Muséum national d'Histoire naturelle, Centre National de la Recherche Scientifique, Sorbonne Université, CP 116, 57 rue Cuvier, 75005 Paris, France

^b Centre d'Ecologie et des Sciences de la Conservation (CECS), Muséum national d'Histoire naturelle, Station de Biologie Marine, 1 place de la Corderie, 29000 Concarneau, France

^c Institut de Médecine, de Santé et de Médecine de l'Environnement de l'Université (IMPER), Sorbonne Université, Centre National de la Recherche Scientifique, Muséum national d'Histoire naturelle, 1 place de la Corderie, 75005 Paris, France

^d CEFE, UMR Montpellier, CNRS, EPHE, IRD, Montpellier, France

ARTICLE INFO

Keywords:

Bats

Chiroptera

Climate science

Diel activity pattern

Mitigation measures

Pearce acoustic monitoring

ABSTRACT

Although diel activity time is a major axis of species' niche space, very few conservation measures focus on preserving daily periods free of anthropogenic pressures. While the spatial ecology of bats has received much attention, less is known about their temporal ecology, the knowledge being dispersed in studies of limited geographical, spatial and temporal range. We used data from the French monitoring programme on bat activity, acoustic surveys and acoustic monitoring (4640 surveys and 1000000000 activity records) recorded from 2014 to 2020 to characterize the diel activity patterns of 20 bat species so that their consideration in mitigation measures can help conservation. We designed a method to extract times of key descriptors and describe bat activity distribution throughout the night. We found that bat species could be separated in three functional groups characterized by a different activity, an activity that peaks when it is most likely to affect an intertropical activity. We showed correlations of bat activity with environmental variables. We argue that accounting for these complex activity patterns would help design efficient mitigation measures, for instance to reduce the exposure of bats to light pollution or wind turbines. Overall, we advocate multi-taxa approaches to design conservation policies adapted to both the temporal and spatial distributions of species.

1. Introduction

To address conservation issues, biological conservation must be holistic, considering multiple spatial and temporal scales (Gaston and Hauer, 2010). Spatial ecology has developed to meet this challenge and guide conservation measures from local to global scales (e.g. from the designation of local reserves to the rationalized designation of networks of protected areas and corridors). Space protection has fit in (international) regulations and global discussions (e.g. National park designations, Convention on Biological Diversity, protection of terrestrial surfaces protected by 2020). Conversely, and despite the importance of time in shaping ecosystems, temporal ecology has received much less attention (Volkovitsch et al., 2014).

Since anthropogenic changes can alter temporal dynamics of ecosystems at various scales, protecting time should be as important a

concern as protecting space. However, conservation measures explicitly based on the temporal ecology of species are mainly implemented at the seasonal scale (e.g. hibernation, migration, breeding). They generally focus on the annual scale (e.g. changing timing of building work to avoid bat hibernation and maternity seasons, delaying mowing in pastures to protect chicks and nests of ground nesting birds, prohibiting hunting of species during reproduction, etc.) (Sutherland et al., 2021). In contrast, finer temporal scales are rarely accounted for in conservation measures.

Although diel activity time is a major axis of species' niche space (Edwards, 1974), very few conservation measures focus on preserving daily periods free of anthropogenic pressures. In response to the 24-h periodicity of their environment, living organisms have developed endogenous circadian rhythms entrained by exogenous influences (e.g. temperature and light-dark cycles) (Aushoff, 1989; Ekerdt, 1992).

* Corresponding author at: Station de Biologie Marine, 1 place de la Corderie, 29000 Concarneau, France.

E-mail addresses: lea.mariton@cecs.fr (L. Mariton), isabelle.viol@cecs.fr (I. Le Viol), yves.bas@cecs.fr (Y. Bas), christian.kerbiriou@mnHN.fr (C. Kerbiriou).

<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2022.109852>

Received 7 October 2022; Received in revised form 24 November 2022; Accepted 6 December 2022

Available online 21 December 2022

0301-0198/© 2022 Elsevier Ltd. All rights reserved.

ainsi qu'aux prédateurs. Enfin, un groupe « intermédiaire » adopte un fonctionnement entre ces deux extrêmes, avec des pics plus modérés mais une présence notable aux deux extrémités de la nuit.

La saison joue un rôle majeur : les profils d'activité restent globalement stables, mais leur intensité varie fortement. Les graphiques de la page 7 montrent que beaucoup d'espèces concentrent davantage leur activité en fin de nuit durant l'été, période correspondant à l'allaitement. Les femelles doivent alors accumuler un maximum d'énergie pour produire du lait, tout en revenant régulièrement au gîte pour nourrir leurs jeunes. À cette période, les nuits courtes les obligent aussi à exploiter chaque minute disponible, ce qui explique une activité accrue juste avant l'aube. À l'inverse, en automne, lorsque les jeunes sont émancipés, l'activité est souvent plus répartie et moins intense.

Ces résultats apportent un éclairage essentiel pour la conservation. Aujourd'hui, de nombreuses mesures cherchent à réduire les impacts des activités humaines sur les chauves-souris — extinction partielle des lumières publiques, adaptation de l'éclairage, limitation des éoliennes aux moments les plus sensibles, etc. Mais la plupart de ces dispositifs reposent sur des horaires arbitraires ou adaptés aux besoins humains plutôt qu'aux véritables rythmes biologiques des espèces. L'article montre clairement que de nombreux schémas d'extinction nocturne commencent trop tard pour certaines espèces, ou s'arrêtent trop tôt, laissant les chauves-souris exposées à la lumière dans leurs périodes clés d'activité.

En comprenant précisément à quel moment chaque espèce sort, atteint son maximum d'activité ou retourne au gîte, il devient possible de concevoir des politiques beaucoup plus efficaces. Les auteurs imaginent par exemple des extinctions ciblées dans les zones sensibles, démarrant bien avant minuit, ou des algorithmes de régulation d'éoliennes intégrant les heures d'activité des espèces les plus vulnérables. Les données présentées suggèrent également que la meilleure solution passe par une approche combinée : prendre en compte à la fois l'espace — où se trouvent les colonies, les couloirs de vol, les zones de chasse — et le temps — quand les animaux passent réellement.

En révélant l'extraordinaire diversité des rythmes nocturnes des chauves-souris et leur sensibilité aux variations saisonnières, cette étude souligne que protéger la nature ne consiste pas seulement à préserver des lieux, mais aussi à préserver des moments. La nuit n'est pas un bloc uniforme : elle est structurée par des comportements, des besoins, des échanges énergétiques et des risques très différents d'une heure à l'autre. En apprenant à connaître et respecter ces temporalités, la conservation peut faire un pas décisif vers une meilleure protection de ces espèces discrètes mais essentielles au fonctionnement des écosystèmes.

Dim light pollution prevents diapause induction in urban and rural moths

Une faible pollution lumineuse empêche l'induction de la diapause chez les papillons de nuit, qu'ils soient urbains ou ruraux

Revue

Journal of Applied Ecology

Auteurs

T. Merckx, M.E. Nielsen, T. Kankaanpää, T. Kadlec, M. Yazdanian, & S.M. Kivelä

Institution d'affiliation du premier auteur

Biology Department, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgique ; Ecology and Genetics Research Unit, University of Oulu, Oulu, Finlande.

Résumé

Dans la plupart des régions tempérées, la survie hivernale des insectes dépend d'un mécanisme essentiel : la diapause. C'est une sorte d'hibernation déclenchée chez les larves quand les jours raccourcissent, un signal fiable annonçant l'arrivée de l'hiver. Or cette étude révèle que même une lumière artificielle extrêmement faible, comparable à celle du halo lumineux des villes visibles à des dizaines de kilomètres, suffit à perturber complètement ce mécanisme chez un papillon de nuit commun, *Chiasmia clathrata*. L'expérience menée par les chercheurs est d'une ampleur exceptionnelle : ils ont prélevé des populations dans plusieurs pays européens, en zones urbaines et rurales, puis ont élevé leurs descendants dans des conditions contrôlées, avec ou sans une très faible lumière nocturne reproduisant le *skyglow* (0,7 lux). Les images et cartes de la page 3 montrent la diversité des sites échantillonnés, allant d'Helsinki à Bruxelles, Prague ou Stockholm, illustrant le contraste entre zones sombres rurales et environnements urbains très éclairés.

Les résultats sont sans appel. Dès que les larves sont exposées à cette faible luminosité nocturne, elles interprètent la nuit comme trop courte, ou la journée comme trop longue. Conséquence immédiate : elles n'entrent plus en diapause et poursuivent leur développement, comme si l'hiver n'allait jamais arriver. Les graphiques de la page 6 (Figure 2) révèlent l'ampleur du phénomène : dans les populations d'Europe (Belgique et Tchéquie), 100 % des individus exposés à cette lumière douce se développent directement sans jamais entrer en diapause. En Europe du Nord, l'effet reste spectaculaire, même s'il est un peu atténué, signe que ces populations sont déjà habituées à des nuits d'été naturellement très lumineuses. Cette différence latitudinale est une découverte majeure : elle signifie que les populations vivant sous des latitudes moyennes — là où se trouvent la majorité des grandes villes européennes et la majorité du *skyglow* mondial — sont les plus vulnérables.

L'étude montre également que cette sensibilité à la lumière artificielle touche autant les papillons issus de milieux urbains que ruraux. Contrairement à ce que l'on aurait pu imaginer, les populations urbaines n'ont pas évolué pour compenser la pollution lumineuse. Leurs réactions sont identiques à celles des populations rurales, malgré des années — voire des

Received: 15 August 2022 | Accepted: 7 February 2023
DOI: 10.1111/1365-2664.14837


RESEARCH ARTICLE
 **Journal of Applied Ecology** 

Dim light pollution prevents diapause induction in urban and rural moths

Thomas Merckx^{1,2} | Matthew E. Nielsen² | Tuomas Kankaanpää² |
Tomáš Kadlec³ | Mahtab Yazdanian² | Sami M. Kivelä²

¹Biology Department, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium
²Ecology and Genetics Research Unit, University of Oulu, Oulu, Finland
³Department of Ecology, Czech University of Life Sciences Prague, Prague-Suchdol, Czech Republic

Correspondence
Thomas Merckx
Email: thomas.merckx@vub.be

Funding information
Academy of Finland, Grant/Award Number: 314833, 319098 and 345363;
Kuusamo Institute

Handling Editor: Lorenzo Marioli

Abstract

1. Light pollution is increasingly affecting biodiversity and may also disrupt seasonal adaptations. Even dim artificial light, such as *skyglow*—which can spread far beyond urban areas—can interfere with using photoperiod as a seasonal cue.

2. Here, we test how light pollution impacts diapause induction and whether urban evolution counteracts it, by using common-garden experiments with a common, widespread geometrid moth (*Chiasmia clathrata*). We raised offspring from urban and rural populations from North- and Mid-European countries in treatments with and without dim light at night.

3. The dim light treatment strongly increased direct development overall—with no evidence for urban adaptation to it—but distinctly more so in Mid- than in North-European populations.

4. Because diapause induction is critical for surviving winter, these results indicate that dim but widespread light pollution may have detrimental effects on insect populations, especially so at mid-latitudes, and may hence explain part of the ongoing, large-scale insect declines globally.

5. *Synthesis and applications.* Latitudinal variation in sensitivity to light pollution means that its contribution to insect declines—and its conservation importance—should likewise vary among regions. In mid-latitude regions, where populations seem more sensitive to light pollution, mitigating light pollution should be a high priority for insect conservation. Reducing *skyglow* from cities should benefit both urban populations—which were just as susceptible as rural populations in our study—and rural populations—because *skyglow* extends far beyond the geographic boundaries of cities.

KEY WORDS
artificial light at night, development time, dim light at night, global change, lepidoptera, phenotypic plasticity, *skyglow*, urban evolution

1 | INTRODUCTION

Light pollution introduces artificial light into the nocturnal environment, disrupting the natural daily light-dark cycle and hence

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© 2023 The Authors. *Journal of Applied Ecology* published by John Wiley & Sons Ltd on behalf of British Ecological Society.

1022 | wileyonlinelibrary.com/journal/jae
J Appl Ecol 2023;60:1022–1033

décennies — d'exposition à des nuits artificiellement éclairées. Les auteurs y voient un signal inquiétant : la pression évolutive exercée par l'éclairage artificiel, même très faible, est si diffuse (car le halo lumineux s'étend sur des dizaines de kilomètres) qu'elle affecte simultanément toutes les populations, empêchant l'apparition de différences adaptatives.

Les conséquences écologiques de cette perturbation sont considérables. Si une chenille rate l'entrée en diapause, elle poursuit son développement trop tard dans la saison, alors qu'elle devrait se préparer à l'hiver. Elle arrive à un stade de développement qui n'est pas compatible avec le froid, sépulture, et meurt avant le printemps. La page 1 de l'article rappelle d'ailleurs que la diminution des papillons de nuit est déjà massive en Europe : certaines populations de cette même espèce ont chuté de plus de 50 % en Finlande et de 85 % en Grande-Bretagne en quelques décennies. La lumière artificielle apparaît ici comme un facteur aggravant, voire déterminant, dans ces déclins.

Les auteurs notent aussi que l'exposition à la lumière réduit la durée de développement des larves et diminue légèrement la taille des chrysalides, effets qui pourraient encore réduire leurs chances de survie à long terme. Au-delà du cas de cette espèce, leurs résultats rejoignent un nombre croissant de travaux montrant que la lumière artificielle perturbe les cycles saisonniers de nombreux insectes : moustiques dont la diapause est supprimée, mouches dont le cycle reproducteur se dérègle, chenilles exposées trop tôt à des conditions risquées. L'ensemble dessine une image cohérente : la lumière artificielle n'affecte pas seulement les comportements nocturnes, elle modifie profondément le calendrier biologique des espèces.

L'étude se clôt sur un message clair. La pollution lumineuse n'est pas seulement une nuisance esthétique ni une menace pour quelques espèces sensibles. Une lumière faible, presque imperceptible pour l'œil humain, peut suffire à désynchroniser les cycles vitaux d'insectes communs, essentiels aux chaînes alimentaires et aux écosystèmes. Comme cette lumière diffuse touche aujourd'hui près d'un quart des terres émergées, selon les cartes mondiales du skyglow, elle pourrait être un facteur sous-estimé des déclins massifs d'insectes observés en Europe et ailleurs. Réduire l'intensité des éclairages, mieux les orienter, limiter leur diffusion et repenser notre rapport à la nuit pourraient ainsi offrir des bénéfices immédiats pour la biodiversité, bien au-delà des seuls espaces urbains.



Photographie : David Loose

How artificial light at night may rewire ecological networks: concepts and models

Comment la lumière artificielle nocturne peut reconfigurer les réseaux écologiques : concepts et modèles

Revue

Philosophical Transactions of the Royal Society B (numéro thématique)

Auteurs

D. Sanders, M.R. Hirt, U. Brose, D.M. Evans, K.J. Gaston, B. Gauzens, & R. Ryser

Institution d'affiliation du premier auteur

Environment and Sustainability Institute, University of Exeter, Penryn, Cornwall TR10 9FE, Royaume-Uni.

Résumé

Nous savons déjà que la lumière artificielle modifie les comportements d'une multitude d'espèces. Mais cet article montre quelque chose de plus profond : en bouleversant les horaires d'activité, les déplacements ou la survie d'espèces sensibles, la lumière nocturne peut restructurer l'ensemble des réseaux écologiques – c'est-à-dire les relations invisibles qui relient prédateurs, proies, plantes, pollinisateurs et décomposeurs. Le travail commence par une grande synthèse de la littérature : les auteurs rappellent que presque toutes les études publiées sur ce sujet datent des dix dernières années, signe d'un champ scientifique en pleine expansion. L'infographie de la page 2 (Figure 1) illustre bien cette explosion : une quarantaine d'études seulement existent, mais elles couvrent déjà plusieurs types de communautés — plantes et producteurs primaires, réseaux plantes-pollinisateurs, chaînes trophiques terrestres et aquatiques — avec des effets variés allant de la modification des traits à des réorganisations complètes des interactions.

L'article identifie quatre grandes voies par lesquelles la lumière artificielle transforme les communautés. La première concerne les plantes, à la base de toutes les chaînes alimentaires. Les expériences montrent que la lumière artificielle peut modifier la phénologie, la biomasse ou la structure des végétaux, affectant ensuite les insectes herbivores et les pollinisateurs. La seconde voie agit comme un filtre : certaines espèces ne supportent pas les nouvelles conditions lumineuses — notamment les strictement nocturnes, très sensibles à de faibles niveaux — et finissent par disparaître localement. À l'inverse, certaines espèces diurnes prolongent leur activité et semblent d'abord « bénéficier » de la lumière, jusqu'à ce que cette activité accrue entame leur condition physique.

La troisième voie touche la répartition des espèces. La lumière agit comme un aimant ou un répulsif : de nombreux insectes volants ou prédateurs arthropodes se concentrent autour des sources lumineuses, tandis que des chauves-souris ou des cougars évitent ces zones éclairées. Ces déplacements créent des zones où certaines espèces deviennent très abondantes et où d'autres disparaissent. Cela modifie les rencontres entre préda-

PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS B

royalsocietypublishing.org/journal/rstb



Review

Cite this article: Sanders D, Hirt MR, Brose U, Evans DM, Gaston KJ, Gauzens B, Ryser R. 2023 How artificial light at night may rewire ecological networks: concepts and models. *Phil. Trans. R. Soc. B* 378: 20220398. <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0398>

Received: 30 March 2023

Accepted: 13 June 2023

One contribution of 17 to a theme issue 'Light pollution in complex ecological systems'.

Subject Areas:
ecology

Keywords:
light pollution, ecological communities, human impact, niche, activity patterns

Author for correspondence:
Dirk Sanders
e-mail: d.sanders@exeter.ac.uk

How artificial light at night may rewire ecological networks: concepts and models

Dirk Sanders¹, Myriam R. Hirt^{2,3}, Ulrich Brose^{2,3}, Darren M. Evans⁴, Kevin J. Gaston¹, Benoit Gauzens^{1,3} and Remo Ryser^{1,3}

¹Environment and Sustainability Institute, University of Exeter, Penryn, Cornwall TR10 9FE, UK

²German Centre for Integrative Biodiversity Research (iDiv) Halle-Jena-Leipzig, 04129 Leipzig, Germany

³Institute of Biodiversity, Friedrich Schiller University Jena, 07743 Jena, Germany

⁴School of Natural and Environmental Sciences, Newcastle University, Newcastle upon Tyne NE1 7RU, UK

DS: 0000-0003-2383-8693; MRH: 0000-0002-8112-2020; DME: 0000-0003-4061-6726;

KG: 0000-0002-3771-8986

Artificial light at night (ALAN) is eroding natural light cycles and thereby changing species distributions and activity patterns. Yet little is known about how ecological interaction networks respond to this global change driver. Here, we assess the scientific basis of the current understanding of community-wide ALAN impacts. Based on current knowledge, we conceptualize and review four major pathways by which ALAN may affect ecological interaction networks by (i) impacting primary production, (ii) acting as an environmental filter affecting species survival, (iii) driving the movement and distribution of species, and (iv) changing functional roles and niches by affecting activity patterns. Using an allometric-trophic network model, we then test how a shift in temporal activity patterns for diurnal, nocturnal and crepuscular species impacts food web stability. The results indicate that diel niche shifts can severely impact community persistence by altering the temporal overlap between species, which leads to changes in interaction strengths and rewiring of networks. ALAN can thereby lead to biodiversity loss through the homogenization of temporal niches. This integrative framework aims to advance a predictive understanding of community-level and ecological-network consequences of ALAN and their cascading effects on ecosystem functioning.

This article is part of the theme issue 'Light pollution in complex ecological systems'.

1. Introduction

Artificial light at night (ALAN) from a variety of anthropogenic light sources is spilling into large areas of terrestrial, freshwater and coastal environments around the world, markedly changing natural light regimes [1–4]. This impact, while most intense in urban contexts, extends over a much greater geographical area through rural light installations, traffic and skylight, where ALAN is scattered far into the landscape through atmospheric water, dust and gas molecules [4,5]. Research into the impact of ALAN has documented the responses of many organisms to this widespread and increasing anthropogenic environmental pressure [6]. Biological responses to ALAN exposure are particularly strong for physiology and behaviour, with different aspects of organismal biology affected either negatively or positively [6–8]. This indicates that by changing the environmental context, ALAN has a strong impact on the performance of a wide range of species. However, while many single-species responses are well documented, a comprehensive understanding is still lacking of how ALAN causes changes to the ways that species interact, and thus how it affects whole ecological communities and the ecological processes that they deliver [9–12].

© 2023 The Authors. Published by the Royal Society under the terms of the Creative Commons Attribution License <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>, which permits unrestricted use, provided the original author and source are credited.

THE ROYAL SOCIETY
PUBLISHING

teurs et proies, parfois de façon spectaculaire. Certaines figures de la page 4 illustrent par exemple comment la présence de lumière peut augmenter la densité de proies dans des zones données, avec un impact direct sur la prédation nocturne et diurne.

La quatrième voie est peut-être la plus fondamentale : celle des rythmes d'activité. La lumière artificielle nocturne efface partiellement la frontière entre jour et nuit. Certaines espèces diurnes ou crépusculaires prolongent leurs activités très tard, alors que des espèces nocturnes se retirent ou réduisent leurs déplacements. Les exemples cités sont nombreux : des oiseaux chantent plus tôt, des parasitoïdes chassent la nuit sous éclairage blanc, certains poissons marins deviennent prédateurs nocturnes, des insectes fuient ou se laissent attirer par la lumière. Les graphiques de la page 3 (Figure 2) montrent bien la complexité de ces décalages et la manière dont ils modifient les niches temporelles, c'est-à-dire les moments où chaque espèce accomplit ses activités essentielles.

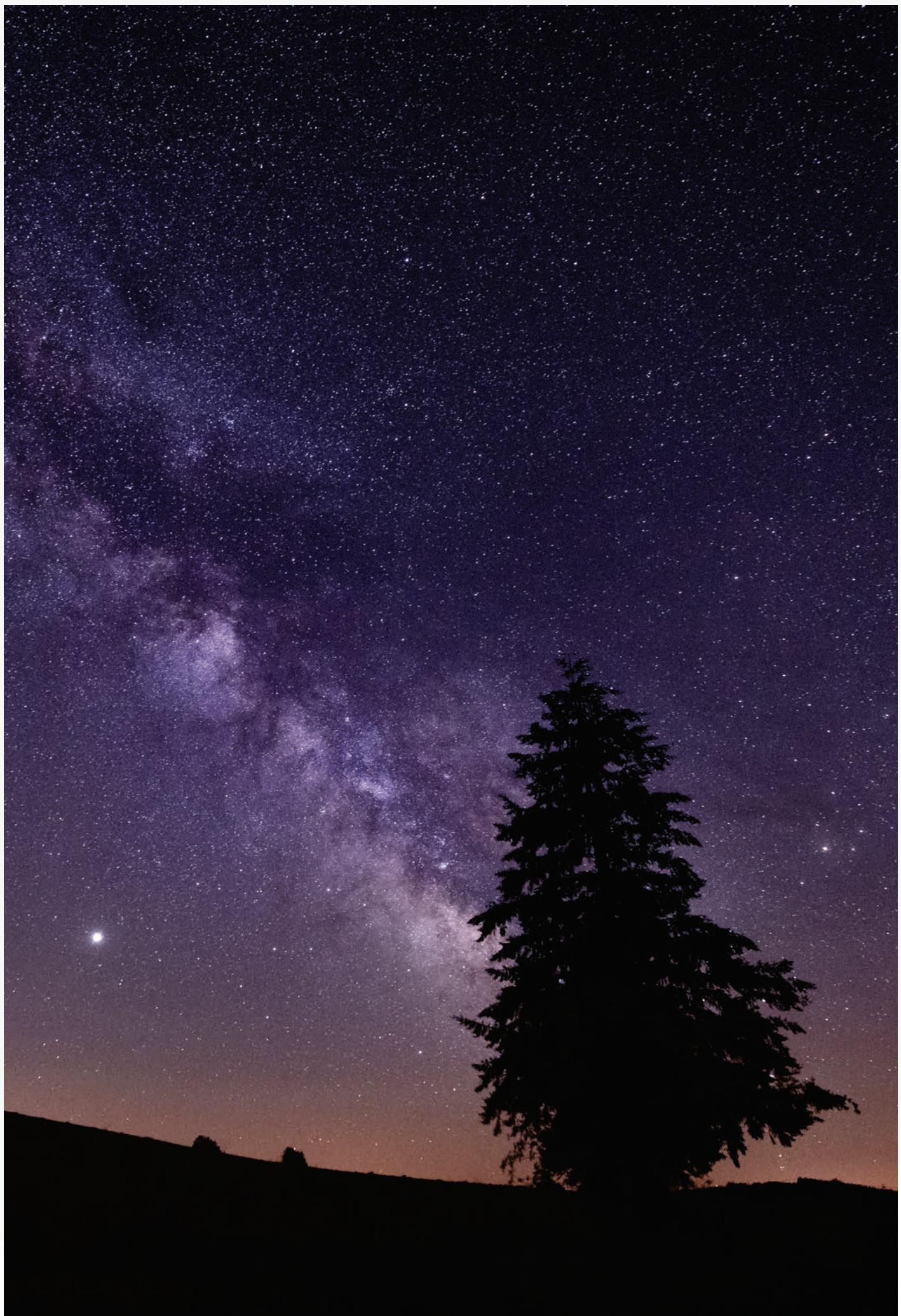
Pour comprendre les effets globaux de ces décalages, les auteurs ont ensuite développé un modèle simulant des réseaux trophiques entiers — 20 espèces de plantes et 40 espèces animales — avec des horaires d'activité diurnes, crépusculaires et nocturnes. L'idée est simple : un prédateur et une proie doivent être actifs au même moment pour interagir. Dès que la lumière artificielle fait basculer l'horaire d'une espèce, toutes les interactions autour d'elle peuvent changer. Les scénarios représentés dans les figures des pages 6 et 7 montrent comment un décalage même modeste peut défaire ou créer des liens trophiques, renforcer certaines relations ou en affaiblir d'autres. Par exemple, si des espèces crépusculaires décalent leur activité vers la nuit, elles rencontrent beaucoup plus d'espèces nocturnes et quasiment plus d'espèces diurnes. Le réseau se recompose alors autour de nouvelles interactions.

Les résultats sont frappants. Lorsque la lumière conduit à une homogénéisation des activités — autrement dit, quand plus d'espèces se retrouvent actives au même moment — la stabilité du réseau chute fortement. Le graphique de la page 8 (Figure 5) montre que ce scénario (le scénario 4, où espèces diurnes et crépusculaires se décalent vers la nuit) entraîne le plus haut taux d'extinction. À l'inverse, si la lumière pousse certaines espèces nocturnes à se décaler encore davantage dans la nuit, réduisant les chevauchements temporels, les réseaux deviennent un peu plus stables : moins d'interactions, moins de compétition, moins de prédation accrue.

L'étude montre donc que la lumière artificielle n'affecte pas seulement l'abondance des espèces ou leur comportement isolément. Elle peut réécrire la structure même des réseaux écologiques : qui mange qui, qui pollinise quoi, quelles espèces coexistent et lesquelles disparaissent. En modifiant les moments où les espèces se rencontrent, elle modifie les forces des liens trophiques et les équilibres subtils qui assurent la stabilité des communautés. À terme, ces changements peuvent entraîner une simplification des réseaux, une perte de biodiversité et un fonctionnement altéré des écosystèmes.

Enfin, l'article souligne que ces effets peuvent s'ajouter à d'autres pressions, comme le changement climatique ou la fragmentation des habitats. La lumière artificielle peut, par exemple, accentuer les effets de nuits plus chaudes, en poussant encore davantage certaines espèces à devenir nocturnes. Les auteurs appellent donc à documenter beaucoup plus précisément les décalages d'activité au sein des communautés et à intégrer ces mécanismes dans les stratégies de gestion de la lumière. En conclusion, ils montrent que la pollution lumineuse n'est pas seulement une nuisance visuelle ou un stress isolé : c'est un facteur capable de reconfigurer en profondeur l'architecture de la vie nocturne, et donc le fonctionnement des écosystèmes entiers.





Photographie : Samuel Challéat

LES CONTRIBUTIONS MARQUANTES DANS LES CHAMPS DES SCIENCES DE LA SOCIÉTÉ ET DES SCIENCES DU TERRITOIRE

Night Landscapes: A Challenge to World Heritage Protocols

Les paysages nocturnes : un défi pour les protocoles du Patrimoine mondial

Revue

Landscape Review

Autrices

A. Loveridge, R. Duell, J. Abbari, & M. Moffatt

Institution d'affiliation du premier auteur

Department of Sociology, University of Canterbury, Private Bag 4800, Christchurch, Aotearoa, Nouvelle Zélande.

Résumé

L'article explore une idée encore récente dans le champ de la conservation : reconnaître le paysage nocturne comme un paysage à part entière, potentiellement éligible au Patrimoine mondial de l'UNESCO. Le Mackenzie Basin, au sud de la Nouvelle-Zélande — région montagneuse déjà classée réserve internationale de ciel étoilé — sert ici de cas d'étude. Il combine un ciel exceptionnel, des enjeux agricoles, un tourisme en pleine croissance et de fortes traditions culturelles, constituant un terrain idéal pour examiner comment les dispositifs du Patrimoine mondial pourraient intégrer ces paysages célestes mêlant nature, culture et science.

Les auteurs montrent que la notion de paysage nocturne bouscule les cadres de gestion habituels. Les outils du Patrimoine mondial ont été conçus pour des paysages terrestres, visibles le jour, alors que la qualité du ciel dépend de facteurs diffus : éclairage artificiel lointain, usages agricoles, villages, activités touristiques, observatoires astronomiques, mais aussi relations culturelles à la nuit. Le Mackenzie Basin illustre cette hybridité : un espace mêlant terres privées, zones protégées, observatoires, paysages glaciaires, biodiversité rare et traditions maories.

L'UNESCO n'a pas encore formalisé de critères pour reconnaître les paysages nocturnes, mais l'essor des réserves de ciel étoilé et des « fenêtres sur l'Univers » identifiées par l'Union astronomique internationale montre que cette évolution est proche. Les principes d'authenticité, d'intégrité et de valeur universelle exceptionnelle doivent donc être repensés.

Night Landscapes: A Challenge to World Heritage Protocols

ALISON LOVERIDGE, REBECCA DUELL,
JULIE ABBARI AND MICHELLE MOFFAT

Starlight reserves are a relatively new concept whose definition and management protocols have come about in an era when understandings of human relationships with nature are dynamic and infused with cultural meaning. Rather than assuming that pristine nature can be sealed off from human influences, World Heritage guidelines now accept that our experience of nature may be enriched by attention to the multifunctional landscape, in which a blend of aesthetic, historical, cultural, scientific and environmental elements are carefully presented to tourists.

Observatories and clear night skies are ideal sites for such an interface, and the loss of dark skies has led to new systems of audit aimed at their preservation. This study of the potential for a World Heritage Site in the Mackenzie Basin, in the South Island of New Zealand, grounds the interaction between World Heritage goals and management of land use in a place where exceptional sky quality and competing land uses challenge multiple stakeholders to rethink their concepts of landscape.

Corresponding author:
Dr Alison Loveridge is a Lecturer in Sociology at the Department of Sociology, University of Canterbury, Private Bag 4800, Christchurch, Aotearoa New Zealand.
Telephone: +64-3-364-2981
Fax: +64-3-364-2977
Email: alison.loveridge@canterbury.ac.nz

KEY WORDS
World Heritage Site
Multifunctional landscapes
Celestial tourism

Appreciation of landscape and outdoor activity forms the basis of tourism in the Mackenzie Basin (see Figure 1). Not only is the landscape important in its own right, but the golden tussock frames the first glimpse of Aoraki/Mount Cook for many of the over 300,000 visitors annually to the national park and Te Wāhipounamu World Heritage Site. While the Basin delights many travelling through the area, few are present at night. This number is increasing as a night landscape of stars complements the daytime 'big skies' of the Mackenzie Basin, which is well known for its sunsets, sunrise and cloud formations (Thompson, 2011, p 162). This paper investigates how World Heritage certification might help with management of the night sky in the Basin. The World Heritage certification process encourages a holistic assessment of the landscape and requires conservation values, cultural values and development needs of local people to be addressed.

Current dark sky quality assurance schemes

International Dark-Sky Association (IDA) reserve certification has already been awarded to the Mackenzie Basin, one of four large areas designated internationally between 2008 and 2012 to have exceptional sky quality (International Dark-Sky Association, 2012). The reserve's focal point is the Mount John observatory, which has required careful shielding from local lighting since the 1980s. While the three earlier reserves are either national parks or nature reserves, the Aoraki Mackenzie Dark Sky Reserve is a multifunctional area, partly conservation estate, partly Crown land and partly private land.

The IDA reserve status has encouraged visitors (Littlewood, 2013a) and will reinforce the importance of regulations that ensure local development must not

REFLECTION

sés : l'authenticité englobe à la fois la qualité scientifique du ciel et les liens culturels qui unissent les communautés à la voûte céleste ; l'intégrité renvoie à la protection d'un ciel sombre et étendu, nécessitant de larges zones tampons car la lumière se propage sur de grandes distances.

L'article détaille les défis de gestion : diversification agricole, irrigation, nouveaux lotissements, expansion touristique, pressions foncières. Les montagnes jouent un rôle de barrière contre la pollution lumineuse venue de la côte, mais cette protection reste fragile. Le développement urbain et touristique peut rapidement dégrader l'expérience du ciel, pourtant essentielle à l'économie locale — astrotourisme à Tekapo, observatoire du Mount John.

Les tensions autour de l'aménagement sont fréquentes. Le statut d'*Outstanding Natural Feature/Landscape*, attribué à presque toute la région, est contesté par certains agriculteurs en raison des restrictions qu'il implique. Les débats juridiques montrent combien la notion de « paysage exceptionnel » est un terrain de confrontation entre visions de la nature, intérêts économiques et conservation. Pour les auteurs, la réussite d'un éventuel site du Patrimoine mondial centré sur un paysage nocturne dépend d'une gouvernance véritablement partagée : autorités locales, agriculteurs, communautés maories, acteurs touristiques, scientifiques et services de conservation.

Enfin, l'article insiste sur la multifonctionnalité du Mackenzie Basin : préserver le paysage nocturne suppose de considérer les paysages terrestres, les pratiques humaines et les effets écologiques de la lumière. La pollution lumineuse menace biodiversité, esthétique nocturne et cultures locales. Ici, jour et nuit forment un continuum rendant possible, pour la première fois, l'idée d'un site du Patrimoine mondial combinant intimement nature terrestre, relations culturelles et qualité du ciel.

En conclusion, les paysages nocturnes pourraient devenir un nouveau champ majeur du Patrimoine mondial, exigeant de repenser les critères de valeur universelle exceptionnelle. Le Mackenzie Basin apparaît comme un territoire pionnier où le ciel étoilé, loin d'être un simple décor, devient un élément structurant de l'identité locale, du tourisme et de la conservation, ouvrant la voie à une nouvelle manière d'habiter les paysages, sous le soleil comme sous les étoiles.



Photographie : David Loose

Regulating light pollution: More than just the night sky

Réguler la pollution lumineuse : bien plus que le ciel étoilé

Revue

Science (numéro thématique)

Auteur

M. Morgan-Taylor

Institution d'affiliation du premier auteur

Leicester De Montfort Law School, De Montfort University, Leicester, Royaume-Uni.

Résumé

L'article défend une idée centrale : la pollution lumineuse n'est pas qu'un problème pour les astronomes. C'est une pollution à part entière, aux effets multiples — sanitaires, écologiques, énergétiques et climatiques — et pourtant encore traitée dans le débat public comme une simple perte de nuit étoilée. Cette perception biaisée explique en partie pourquoi tant de gouvernements tardent à réguler efficacement l'éclairage nocturne, malgré l'accumulation de preuves scientifiques montrant l'ampleur des dommages. Dès les premières lignes, l'auteur rappelle que la lumière artificielle à la nuit (ALAN) contribue au gaspillage énergétique, aggrave l'urgence climatique, perturbe le sommeil, nuit à la santé humaine, déstabilise les écosystèmes et affecte d'innombrables espèces. Mais dans les médias, elle est encore trop souvent présentée comme un enjeu secondaire, réservé aux amateurs de ciel profond.

L'article examine ensuite les différents types de régulations existantes dans le monde. Certaines relèvent du « *hard law* », des lois contraignantes votées au niveau national ou supranational ; d'autres prennent la forme de recommandations non obligatoires (« *soft law* »). Certaines juridictions construisent des lois spécifiquement dédiées à la lumière nocturne, tandis que d'autres « greffent » quelques règles sur des textes existants — une méthode souvent plus rapide, mais moins efficace. L'efficacité de toute régulation dépend toutefois de sa mise en œuvre : il faut des moyens, des contrôles, une vraie volonté politique et une compréhension claire du public des dommages causés par la lumière.

L'auteur passe en revue plusieurs exemples internationaux. Sur le plan supranational, les Nations Unies ont récemment publié des lignes directrices pour protéger les oiseaux et les chauves-souris. Au niveau européen, la pollution lumineuse est désormais mentionnée dans plusieurs initiatives du *Green Deal*, comme le Plan d'action zéro pollution, ou encore dans la nouvelle stratégie pour les pollinisateurs. Pourtant, malgré ces signaux positifs, les avancées restent lentes.

La France est présentée comme l'un des pays les plus ambitieux. Son arrêté de 2018 couvre un spectre très large d'enjeux — humains, écologiques, astronomiques — et impose des règles claires : couvre-feux lumineux, limitations strictes de la lumière bleue (2400 à 3000 K), interdiction de lasers puissants, réduction de l'éblouissement, limitation de la lumière intrusive dans les habitations, et protection renforcée de onze zones astronomiques

SPECIAL SECTION **LIGHT POLLUTION**



A national law regulating artificial light affects many Koreans, particularly in cities such as Seoul, where local authorities have power to impose fines.

disadvantages of light at night might be effectively balanced. It must cover the spectrum of problems caused by light at night and be enforced in practice. And it must be simple, easy to understand, and as cheap as possible to enforce. Underpinning this is a need for a proper understanding of the problem and practical solutions that can be tested with scientific evidence. A general understanding is required of the wider problems that ALAN may cause on all, not just the loss of the night sky. Perceptions of need and economics, in the eyes of the public, policy-makers, and enforcement bodies, are all critical.

EXAMPLE REGIMES

Supranationally, the United Nations Environment Programme has recently published draft light pollution guidance for birds and bats (3). Also, a growing number of nations are adopting national laws with France and the Republic of Korea serving as examples of jurisdictions that have adopted hard law approaches. Some US states have hard law and other jurisdictions, such as those in the UK, have adopted "bolt on" approaches. We will examine initiatives in the European Union (EU), France, Korea, and the UK as examples.

European Union

Light pollution was on the agenda of the Czech Republic Presidency of the EU in 2022. An outline of European initiatives and contributions (4) is listed. It is out of 27 European nations as having some form of national legislation, and the emerging underlying physical, ecological, social, and health scientific research that states the case for regulation. Light pollution is also beginning to be addressed by the EU block itself; the EU's Circular Economy Strategy on Circular Cities Lighting and Traffic Signals provides street-lighting recommendations, which includes addressing light pollution (5), for policy-makers and lighting professionals. This report also includes a section on lighting products that are subject to the EU Ecolabel, which is the Ecolabel for lighting standard. Primarily designed to save energy, these standards also serve to reduce all other negative effects of ALAN. The Zero Pollution Action Plan of the European Green Deal names light pollution as an emerging pollutant and the first EU-wide light pollution initiative is named as a cause of pollution (6). Although such recognition is good, progress is slow in actually reducing light pollution. Continuing scientific research of these fields will support calls for further regulation.

1118 16 JUNE 2023 • VOL 399 ISSUE 6659

SCIENCE

sensibles. L'article insiste sur le caractère exemplaire de cet arrêté, notamment parce qu'il s'appuie sur les connaissances scientifiques et parce qu'il inclut aussi les particuliers, souvent oubliés dans les réglementations.

La République de Corée est l'autre exemple marquant, avec une loi centrée sur l'énergie et les nuisances lumineuses, basée sur des standards techniques mesurables (les zones E1 à E4 définies par la CIE). Ce système, très transparent, permet à chacun de vérifier si une installation dépasse les seuils autorisés. Il facilite ainsi les contrôles tout en réduisant les conflits. Les autorités locales peuvent imposer des amendes, ce qui renforce l'efficacité du dispositif, même si cette approche métrique ne s'accompagne pas encore de mesures préventives concernant la vente ou la conception des luminaires.

Le Royaume-Uni, en revanche, a opté pour une stratégie « à l'économie », en ajoutant des considérations lumineuses dans deux cadres existants : l'urbanisme et les nuisances. Ce choix, bien qu'immédiat et peu coûteux, montre très vite ses limites : il ne concerne que les nouveaux bâtiments, s'intéresse davantage à l'apparence des luminaires qu'à leurs impacts environnementaux, et ignore totalement les problèmes écologiques ou de santé liés à la lumière nocturne. L'auteur explique pourquoi ce type d'approche, trop étroit, ne peut lutter efficacement contre une pollution aussi diffuse.

La dernière partie de l'article explore les raisons, souvent émotionnelles, qui freinent la régulation. Beaucoup de citoyens associent spontanément lumière et sécurité, pensent que « plus de lumière » réduit le crime, ou perçoivent toute restriction comme une atteinte à leur liberté. Les peurs liées à l'obscurité jouent aussi un rôle puissant. De telles croyances, même infondées scientifiquement, façonnent les décisions politiques et rendent les mesures de sobriété lumineuse difficiles à faire accepter. L'article souligne d'ailleurs que de nombreuses zones labellisées « ciel étoilé » ont contribué à entretenir un malentendu : la protection du ciel serait réservée à quelques espaces éloignés, alors qu'elle devrait aussi concerner les villes, où vivent la majorité des gens.

Pour sortir de cette impasse, l'auteur recommande de changer de discours : plutôt que de parler uniquement du ciel étoilé, il faut mettre en avant les coûts énergétiques, le lien avec le climat, les effets sur la santé humaine, les conséquences pour la biodiversité et la possibilité de mieux concilier sécurité et efficacité sans augmenter la luminosité. L'exemple de Calgary, qui a réduit sa pollution lumineuse tout en économisant des millions de dollars par an grâce à des luminaires mieux conçus, est présenté comme une démonstration claire des bénéfices d'une approche rationnelle.

L'article conclut qu'une régulation efficace doit combiner législation, prévention, bonnes pratiques de conception, éducation et participation des acteurs locaux. Il plaide pour une approche moins émotionnelle et plus fondée sur les preuves scientifiques. En montrant que la lumière artificielle touche directement la santé, l'environnement, le climat et l'économie, l'auteur défend une idée simple : protéger la nuit ne consiste pas à « éteindre pour observer les étoiles », mais à redéfinir ce que signifie un éclairage réellement utile, mesuré, sûr et adapté. Autrement dit : fournir la bonne lumière, au bon endroit, au bon moment — et seulement quand c'est nécessaire.

* * *

Safeguarding Indigenous Sky Rights from Colonial Exploitation

Protéger les droits célestes autochtones face à l'exploitation coloniale

Revue

Chapitre de l'ouvrage *The Routledge Handbook of Social Studies of Outer Space*

Auteurs

K.A. Noon, K. De Napoli, P. Swanton, C. Guedes, & D. Hamacher

Institution d'affiliation du premier auteur

Research School of Astronomy & Astrophysics, Australian National University, Canberra, Australie.

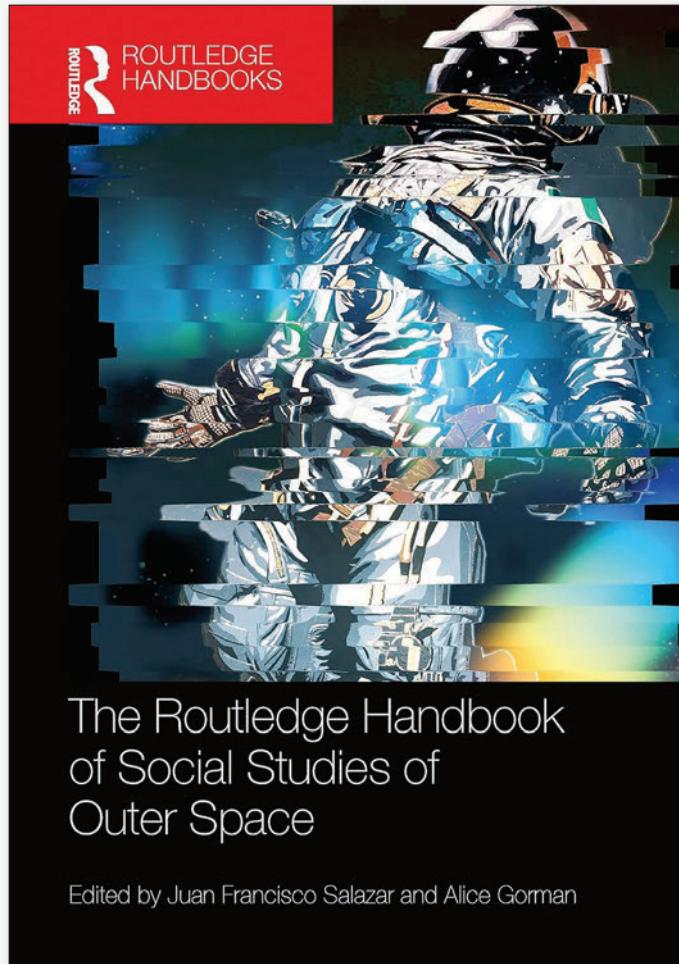
Résumé

Depuis toujours, les peuples autochtones entretiennent une relation intime avec le ciel nocturne. Pour eux, les étoiles ne sont pas seulement des objets lointains : elles sont des ancêtres, des guides, des archives vivantes de la mémoire culturelle, des marqueurs d'identité et des repères essentiels pour l'orientation, l'agriculture, la navigation, les cycles de vie et les récits de création. Le chapitre montre que ces « droits célestes » — un concept encore émergent — constituent un élément fondamental des droits territoriaux, culturels et spirituels des communautés autochtones.

Mais cette relation millénaire est aujourd'hui menacée. Les auteurs mettent en évidence comment l'exploitation coloniale — historiquement centrée sur la terre et la mer — s'étend désormais au ciel et à l'espace. L'urbanisation galopante, l'intensification de la pollution lumineuse, l'industrialisation du ciel nocturne par les méga-constellations de satellites, et la course commerciale vers l'exploitation spatiale altèrent profondément la capacité des peuples autochtones à voir et à pratiquer leur ciel.

Le chapitre souligne que l'obscurité naturelle n'est pas un simple luxe esthétique : elle est indispensable à la transmission des savoirs. Dans de nombreuses cultures, la lecture des étoiles structure la compréhension du monde et rythme la vie collective ; elle relie les générations et façonne des systèmes de connaissances sophistiqués. Avec la disparition progressive des ciels étoilés, ce sont des pans entiers d'héritages culturels qui deviennent inaccessibles, et parfois incompréhensibles, pour les jeunes générations. Les auteurs insistent sur un point crucial : la perte de ciel est une perte de langue, de mémoire et de souveraineté culturelle.

Parallèlement, la multiplication rapide des satellites — souvent lancés par de grandes entreprises privées ou des puissances étatiques — introduit une nouvelle forme de colonialisme : un « colonialisme orbital ». Ces objets artificiels, visibles à l'œil nu, interrompent les observations traditionnelles, brisent des lignes de vision ancestrales, parasitent les pratiques cérémonielles et scientifiques locales, et réaffirment une logique de domination



technologique. Les auteurs soulignent que cette occupation du ciel se fait sans consultation véritable des peuples autochtones, sans consentement préalable, libre et éclairé, et sans gouvernance partagée.

À cela s'ajoute une inquiétude plus profonde : la colonisation de l'espace risque de reproduire dans le cosmos les injustices historiques perpétrées sur Terre. Les communautés autochtones et marginalisées, dont les territoires sont souvent ciblés pour l'installation d'observatoires, de centres de lancement ou d'infrastructures technologiques, subissent déjà de lourds impacts socio-environnementaux. Des montagnes sacrées transformées en plateformes scientifiques aux territoires réquisitionnés au nom du « progrès », les auteurs rappellent que le passé colonial se rejoue dans les politiques spatiales contemporaines, sous des formes parfois subtiles mais toujours asymétriques.

Face à ces menaces, le chapitre appelle à reconnaître et protéger les « *sky rights* » autochtones comme une dimension essentielle des droits humains, de la justice épistémique et de la souveraineté des peuples. Cela implique de préserver des ciels réellement sombres, de limiter la prolifération des satellites visibles, de protéger les territoires autochtones contre les projets industriels imposés, et de veiller à ce que les avancées spatiales ne se fassent pas aux dépens des populations déjà historiquement marginalisées.

Les auteurs proposent finalement une vision plus juste et durable de notre relation au cosmos : une approche où les savoirs autochtones — loin d'être folklorisés — jouent un rôle central dans la gouvernance du ciel et de l'espace ; où la préservation de l'obscurité est considérée comme un patrimoine commun, culturel et écologique ; et où l'exploration spatiale se déroule dans le respect de la diversité des cosmologies humaines.

Ce chapitre invite à repenser profondément la manière dont nos sociétés « possèdent », utilisent et modifient le ciel. Il montre que sauvegarder les droits célestes autochtones, ce n'est pas seulement protéger des valeurs culturelles locales : c'est défendre une vision plurielle, éthique et partagée de notre place dans l'Univers.

* * *



Photographie : Samuel Chaléat

Using Giant Floor Maps to Understand the Heavy Consequences of Light Pollution

Utiliser des cartes géantes au sol pour comprendre les lourdes conséquences de la pollution lumineuse

Revue

The Geography Teacher

Auteurs

B. Palczynsky, & J.S. Greene

Institution d'affiliation du premier auteur

Oklahoma alliance for Geographic education, Norman, oklahoma, USA.

Résumé

Cet article présente une manière originale et résolument ludique d'aborder la pollution lumineuse : faire apprendre aux élèves en marchant littéralement sur le territoire. En utilisant d'immenses cartes au sol — comme celle de l'Oklahoma, longue de plusieurs mètres — les enseignants transforment la salle de classe en un espace d'exploration immersive. L'objectif est d'aider les élèves, du primaire au lycée, à comprendre pourquoi la pollution lumineuse existe, comment elle affecte les humains, la faune et les écosystèmes, et pourquoi il est si difficile de la réduire. Dès les premières pages, les auteurs expliquent que cette approche vise à décloisonner les disciplines : géographie, sciences, mathématiques, histoire ou encore anglais peuvent toutes contribuer à éclairer différents aspects de ce problème environnemental croissant.

L'activité débute par la lecture du livre *Dark Matters: Nature's Reaction to Light Pollution*, qui introduit aux élèves les bases de la lumière artificielle nocturne et ses impacts. Une discussion s'ouvre ensuite, montrant que beaucoup d'enfants ignorent l'existence même de la pollution lumineuse, ou n'en perçoivent que les effets les plus visibles, comme l'impossibilité d'observer la Voie lactée. Les enseignants présentent ensuite une courte leçon sur les impacts de la lumière artificielle : troubles du sommeil humain, perturbation des cycles biologiques des animaux, gaspillage énergétique et transformation des paysages nocturnes. Cette première séance prépare les élèves à comprendre ce qu'ils vont visualiser physiquement sur la carte géante.

Lors de la séance suivante, la carte de 21 mètres carrés est déployée au sol — un moment très visuel, illustré par les photos de la page 3 qui montrent des élèves déambulant dessus comme sur un terrain de jeu. Avant de parler de lumière, les enseignants invitent les élèves à redécouvrir les bases de la cartographie : orientation, symboles, distances, représentation des villes et des reliefs. Une fois ces repères posés, l'exercice clé commence. Les élèves observent une carte de la pollution lumineuse de l'Oklahoma et marquent sur la carte géante, à l'aide de cônes ou de petits objets colorés, les zones où le halo lumineux est le plus intense. Ils remarquent rapidement que les zones les plus éclairées correspondent aux grandes villes, ce qui permet de comprendre que la pollution lumineuse augmente avec la densité de population. Mais la carte révèle aussi des surprises : certaines petites

THE GEOGRAPHY TEACHER
2021, VOL. 29, NO. 2, 81-86
<https://doi.org/10.1080/10938341.2021.2239531>

 Routledge
Taylor & Francis Group

 OPEN ACCESS 

Using Giant Floor Maps to Understand the Heavy Consequences of Light Pollution

Becca Palczynsky and J. Scott Greene

Oklahoma Alliance for Geographic Education, Norman, Oklahoma, USA

Introduction

This lesson plan is designed to help students understand why light pollution exists, how it impacts communities and ecosystems, and the challenges associated with reducing levels of light pollution. Using giant floor maps, this lesson plan outlines an innovative teaching strategy for elementary and secondary geography classrooms that incorporates key geography concepts. In addition, the lesson plan extensions can be used to illustrate how an understanding of geography can lead to a holistic awareness of environmental issues at the intersection of disciplines. The use of giant floor maps also provides an opportunity for students to learn in an active environment.

Overview

This lesson template introduces the Giant Floor Map of Oklahoma and provides examples of how this map can be used to teach instruction on a variety of subjects including mathematics, English language arts, and social studies. The content presented in this lesson was selected as an illustrative example of how different subjects can be used to understand a particular issue that impacts communities differently around the world. This lesson is designed as a template for how the Giant Floor Map can be used to teach a variety of subjects in different grade levels. The following lesson is adaptable to elementary, middle, and high school grade levels depending on which of the listed standards are being taught. Please note the standards listed in this document are only a sample of standards that may potentially be taught using this lesson.

Standards

National Geography Standards from Geography for Life

<https://www.nationalgeographic.org/standards/national-geography-standards/>

- How to use maps and other geographic representations, geospatial technologies, and spatial thinking to understand and communicate information
- How to analyze the spatial organization of people, places, and environments on Earth's surface
- The characteristics and spatial distribution of ecosystems and biomes on Earth's surface
- How human actions modify the physical environment

CONTACT J. Scott Greene  jsgreene@ou.edu Oklahoma Alliance for Geographic Education, Norman, OK 73019-0390, USA

© 2021 The Authors. Published with license by Taylor & Francis Group LLC
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits non-commercial re-use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited, and is not altered, transformed, or built upon in any way. The terms on which this article has been published allow the posting of the Accepted Manuscript in a repository by the author(s) or their consent.

18. How to apply geography to interpret the present and plan for the future

The lesson plan extensions also link to many other standards included in English language arts, mathematics, and social studies. In addition, this lesson addresses many of the key themes of geography; below are some examples.

Place: Physical and human characteristics of locations
Movement: How humans and wildlife navigate Earth's surface and airspace

Human-Environment Interaction: How humans have modified the physical environment to meet their needs and how these modifications have impacted the dynamics of the behavior of physical systems

Region: Organization and grouping of places into areas with common characteristics. In the example provided for this lesson, regions will be used to understand differences in light pollution across Oklahoma and the United States and how this issue may be addressed across regions.

Objectives

The focus of this lesson is on the basics of light pollution and how this pollution affects humans, wildlife, as well as local and global economies. Students should understand why light pollution exists, how it impacts communities and ecosystems, and the challenges associated with reducing levels of light pollution. The application methods differ depending on the subject area in which this lesson is being taught. See the Subject-Specific Giant Map Activities section below.

Materials

One copy of *Dark Matters: Nature's Reaction to Light Pollution*
Presentation file and handouts available at https://drive.google.com/drive/folders/1sN23whgM8Rv8ZUa8-1giQ_9YR814pm62
Internet access for projector
Giant Floor Map of Oklahoma (or any other state) (21 by 3 feet)*
Socks for students and teachers (to be worn on the Giant Map)
"Plastic chains, cups, cones, and other supplies mentioned in this lesson for the Giant Floor Map activities are included in the Giant Floor Map kit.

villes, comme Woodward ou Cushing, sont étonnamment lumineuses. Le texte de la page 5 éclaire ce point : ce sont des centres de l'industrie pétrolière et gazière, dont les installations sont puissamment éclairées la nuit.

L'exercice devient ensuite plus riche encore lorsque les enseignants ajoutent aux cartes les grandes routes de migration du papillon monarque, matérialisées par de longues chaînes en plastique déroulées sur la carte (voir page 5). Les élèves découvrent alors que les chemins migratoires de ces insectes traversent précisément les zones les plus lumineuses du territoire. Une fois l'identité des chaînes révélée, la discussion porte sur la manière dont la lumière artificielle perturbe l'orientation des monarques, qui utilisent la lumière naturelle et le champ magnétique terrestre pour voyager sur des milliers de kilomètres. La lumière nocturne peut les désorienter, les détourner de leur route ou les épuiser — un risque sérieux pour une espèce déjà en difficulté. Les auteurs citent des recherches indiquant que l'exposition à la lumière artificielle peut décaler leur horloge interne ou empêcher leur migration correcte.

Selon la discipline enseignée, les activités se déclinent ensuite de différentes manières : orthographe et vocabulaire liés à l'environnement, exercices de mathématiques basés sur les distances parcourues par les monarques, réflexion en sciences sociales sur les conflits d'intérêts entre astronomes, élus, écologistes et citoyens. La page 6, qui décrit par exemple une activité de mathématiques, montre comment les élèves apprennent à mesurer, collecter et analyser des données tout en manipulant la carte. En sciences sociales, les élèves prennent le rôle d'acteurs confrontés au dilemme de la régulation de l'éclairage public, mettant en lumière la complexité politique du sujet.

La conclusion insiste sur le caractère profondément interdisciplinaire de la pollution lumineuse. Le phénomène n'est pas seulement écologique ou esthétique : il touche les économies locales, la qualité de vie, la mobilisation citoyenne, la sécurité, la santé et l'organisation des territoires. L'article en fait un outil pédagogique puissant : voir la pollution lumineuse, marcher à l'intérieur de ses gradients géographiques, comprendre comment elle interfère avec la faune migratrice, débattre de ses causes et de ses solutions rend les élèves acteurs de leur apprentissage. En transformant l'espace de la classe et en invitant les enfants à « lire » le territoire avec leurs pieds autant qu'avec leurs yeux, cette approche donne toute sa force à l'idée que la géographie est une science vivante, concrète, qui permet de comprendre le monde et d'imaginer des solutions.

L'article se conclut sur une conviction : réduire la pollution lumineuse passe autant par des politiques publiques que par l'éducation. Faire découvrir aux jeunes que la lumière peut être une pollution, et non seulement un symbole de progrès, constitue déjà un geste essentiel pour construire une culture de la nuit plus respectueuse des humains, des écosystèmes et du ciel étoilé.





Photographie : Samuel Challeat

LES THÈSES DE DOCTORAT

Impact de la pollution lumineuse nocturne sur l'huître creuse *Crassostrea gigas* : étude de la perturbation des rythmes biologiques et des conséquences physiologiques

Université de Bordeaux

Autrice

A. Botté

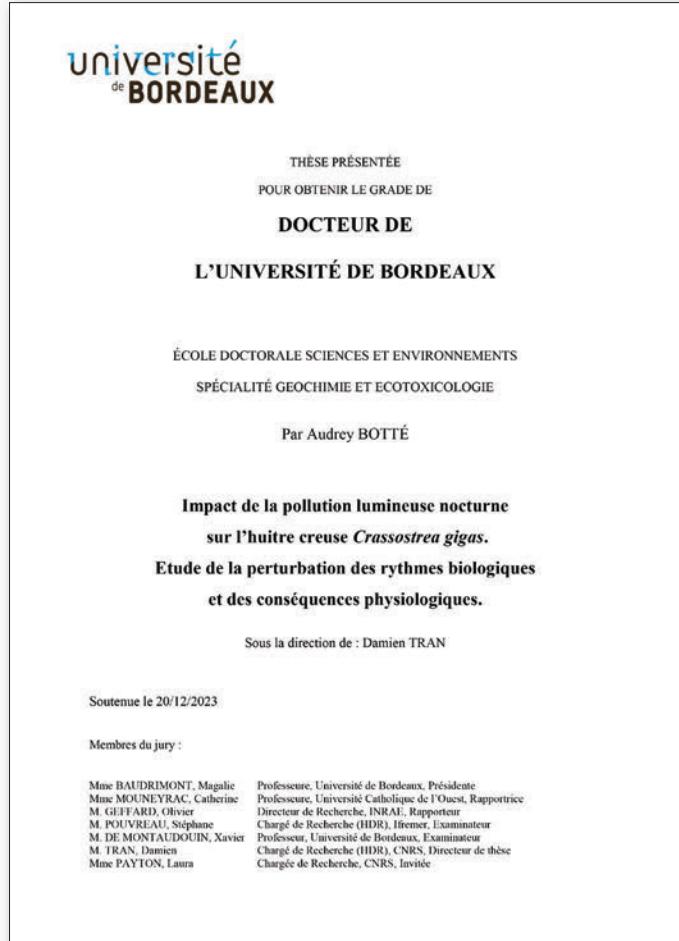
Sous la direction de

D. Tran, UMR CNRS 5805
EPOC Environnements et
Paléoenvironnements Océaniques et
Continents / Université de Bordeaux.
Station Marine d'Arcachon, Place
Peyneau, 33 120, Arcachon, France.

Résumé & apports significatifs

La lumière artificielle nocturne (ALAN) masque les cycles naturels lumineux utilisés par les organismes pour synchroniser leurs rythmes biologiques avec l'environnement. En perturbant ces rythmes, l'ALAN peut avoir de graves conséquences physiologiques. L'ALAN touche fortement les environnements côtiers du fait de l'importante et croissante densité de population humaine. Cependant, malgré cette menace grandissante, les effets de l'ALAN sur ces écosystèmes sont peu étudiés. L'huître *Crassostrea gigas* est une espèce clé des environnements côtiers susceptible d'être exposée à l'ALAN. Ce travail évalue les effets de l'ALAN à des intensités faibles et réalistes sur le rythme journalier comportemental et l'horloge interne de l'huître en fonction de l'intensité, de la composition spectrale et de la modalité d'exposition. Par ailleurs, est aussi étudié l'impact de l'ALAN sur la croissance coquillière et le microbiote branchial de l'huître. Les résultats indiquent que l'ALAN affecte le rythme journalier comportemental de *Crassostrea gigas* et son horloge moléculaire dès 0.1 lx avec les effets les plus forts en lumière bleue et les moins forts en lumière verte. De plus, cette étude suggère que couper les éclairages directs en milieu de nuit mais en présence d'éclairage indirect (« skyglow ») peut aggraver certains effets néfastes. Enfin, l'ALAN diminue la croissance coquillière et entraîne une dysbiose du microbiote branchial. Ces effets sont directement corrélés à la robustesse du rythme journalier.

Cette thèse apporte des résultats sur l'impact de l'ALAN sur les organismes aquatiques en zones côtières, qui restent encore très peu étudiées bien que ce soient des zones d'anthropisation privilégiées impactant fortement les environnements lumineux du littoral.



Ce travail pionnier est axé sur l'huître creuse *Crassostrea gigas*, espèce emblématique de notre littoral et d'intérêt économique de 1er ordre. Ce travail de thèse focalise sur l'impact de l'ALAN sur les caractéristiques des rythmes biologiques et des conséquences physiologiques qui peuvent en découler. Il montre que chez une espèce marine métazoaire dépourvue d'yeux, l'ALAN peut avoir un impact à faible intensité ($\sim 0.1 \text{ lx}$; $\sim 5.85 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$) et dont l'effet est modulé par sa composition spectrale et par sa modalité d'application. Ces résultats montrent bien que chez des huîtres qui ne peuvent fuir la zone impactée par l'ALAN, les conséquences physiologiques peuvent être drastiques et sûrement sous-estimées vu le peu d'informations actuelles sur ces biotopes. Les atteintes écologiques et économiques de l'ALAN sur le littoral restent à évaluer.

* * *



Photographie : Samuel Challeat

Taking light pollution effects on biodiversity into account in conservation measures : challenges and prospects. Case study of European bat species

Prendre en compte les effets de la pollution lumineuse sur la biodiversité dans les mesures de conservation : défis et perspectives. Étude de cas sur les espèces de chauves-souris européennes

Sorbonne Université

Autrice

L. Mariton

Sous la direction de

C. Kerbiriou (CESCO - Centre d'Ecologie et des Sciences de la COnservation (Centre d'Ecologie et des Sciences de la Conservation – 55 rue Buffon – 75 005 PARIS – France), I. Le Viol (Département Ecologie et Gestion de la Biodiversité, Muséum National d'Histoire Naturelle) Paris, France, et B. Zanda (Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie, Muséum National d'Histoire Naturelle Paris, France).

Résumé

Ce dernier siècle, les lumières électriques ont proliféré, modifiant l'environnement nocturne. Des études scientifiques alertent sur les effets négatifs de la lumière artificielle nocturne (ALAN) qui perturbe de nombreux processus écologiques et taxons. Notre objectif a ainsi été de combler des manques de connaissances afin d'aider à une meilleure considération des effets de la pollution lumineuse sur la biodiversité dans les mesures de conservation. Nous avons utilisé les chiroptères comme modèles biologiques car ce sont de bons bioindicateurs de l'effet des pressions anthropiques sur la biodiversité et, étant nocturnes, ils sont directement exposés à l'ALAN. Nous avons préconisé de considérer la distribution temporelle des espèces dans les mesures de conservation, un prérequis étant de connaître leur écologie temporelle. Nous avons utilisé les données d'un programme national de suivis acoustiques des chiroptères (Vigie-Chiro) pour étudier leur rythme d'activité nocturne (9807 nuits, 20 espèces). Nous avons montré que les espèces pouvaient être séparées en trois groupes ayant une activité crépusculaire, en cœur de nuit ou intermédiaire, avec des variations des rythmes d'activité selon les saisons. La prise en compte de ces rythmes complexes aiderait à concevoir des mesures de conservation efficaces, par exemple, en définissant des extinctions partielles de l'ALAN adaptées à des espèces cibles. La plupart des chiroptères émergeant tôt sont des espèces « tolérantes à la lumière » pouvant se nourrir sous les lampadaires. Cependant, à l'échelle du paysage, ces espèces semblent moins abondantes à cause de l'ALAN. Cela pourrait s'expliquer par des perturbations de leur rythme d'activité influant possiblement les dynamiques de population. À l'aide des données Vigie-Chiro, nous avons testé si l'ALAN induisait de telles perturbations pour une de ces espèces (*Eptesicus serotinus*). L'ALAN, et dans une moindre mesure la lumière de la lune, réduisaient son abondance. L'ALAN retardait son activité, ce décalage



Sorbonne Université

Ecole doctorale "Sciences de la nature et de l'Homme : évolution et écologie"

(ED227 MNHN-SU)

CESCO (UMR 7204) / Équipe Conservation et Restauration des populations

IMPC (UMR 7590) / Équipe Research On Carbon-rich Key Samples

Taking light pollution effects on biodiversity into account in conservation measures: challenges and prospects

Case study of European bat species

Par Léa Mariton

Thèse de doctorat de Sciences de la Conservation

Dirigée par Dr Christian Kerbiriou, Dr Isabelle Le Viol, et Dr Brigitte Zanda (HDR)

Présentée et soutenue publiquement le 10 février 2023

Présidente du jury : Dr Sandra Luque

Devant un jury composé de :

M. Godet, Laurent	Directeur de Recherche, Université de Nantes	Rapporteur
M. Tatoni, Thierry	Professeur, Université d'Aix-Marseille	Rapporteur
Mme Baudry, Emmanuelle	Professeure, Université Paris Saclay	Examinateuse
Mme Luque, Sandra	Directrice de recherche, INRAE Montpellier	Examinateuse
M. Speelstra, Koeniel	Researcher, Netherlands Institute of Ecology (NIOO-KNAW)	Examinateur
Mme Le Viol, Isabelle	Maitre de conférences, Muséum national d'Histoire naturelle	Directrice de thèse
M. Kerbiriou, Christian	Maitre de conférences, Sorbonne Université	Directeur de thèse
Mme Zanda, Brigitte	Maitre de conférences, Muséum national d'Histoire naturelle	Directrice de thèse

Except where otherwise noted, this work is licensed under <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>

était amplifié par la couverture nuageuse, possiblement à cause de son effet amplificateur du halo lumineux. Des analyses complémentaires ont suggéré que l'ALAN retardait l'activité de deux autres espèces « tolérantes à la lumière ». Ainsi, même ces espèces devraient être protégées de l'ALAN. Lorsqu'éclairer est nécessaire, changer l'intensité, la direction ou le spectre des éclairages sont des mesures de réduction possibles. Nous assistons à une modernisation des éclairages avec des diodes électroluminescentes (LEDs). Malgré des impacts potentiels sur la biodiversité, peu d'études se sont intéressées à cette évolution. En réanalysant les données d'une étude publiée, nous avons montré que les changements de spectre et d'intensité accompagnant cette évolution avaient des effets additifs et interactifs sur les chiroptères. Quand l'intensité des LEDs augmentait, leur activité décroissait. Avec les données Vigie-Chiro, nous avons montré que les LEDs pouvait réduire la connectivité du paysage pour les chiroptères, cet impact étant atténué en orientant mieux les lumières. Nous avons recommandé d'utiliser des LEDs avec des couleurs plus chaudes et de moindre intensité. Évaluer l'effet de l'ALAN sur la biodiversité implique des approches spatio-temporelles multi-échelles. Malgré les manques, il y a désormais suffisamment de preuves de l'impact de l'ALAN sur les écosystèmes. Les mesures de réduction étant en développement, évaluer leur efficacité et les améliorations possibles est indispensable. Penser la réduction de l'ALAN à l'échelle du paysage est une évolution impérative, d'où l'émergence du concept de trame noire. Un projet transdisciplinaire sur les pratiques communales d'éclairage et leurs évolutions a été initié pendant cette thèse. En effet, puisque l'ALAN n'a pas que des implications écologiques, mais aussi sanitaires et socio-culturelles, une perspective transdisciplinaire est indispensable pour changer nos façons d'éclairer.



Photographie : Samuel Chaléat

LES RAPPORTS TECHNIQUES INSTITUTIONNELS

National Light Pollution Guidelines for Wildlife

Directives nationales sur la pollution lumineuse pour la faune sauvage

Rapport édité par le gouvernement australien (Australian government, Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water).

Auteurs

K. Pendoley, C. Bell, C. Surman, & J. Choi (principaux contributeurs)

Institution d'affiliation du premier auteur

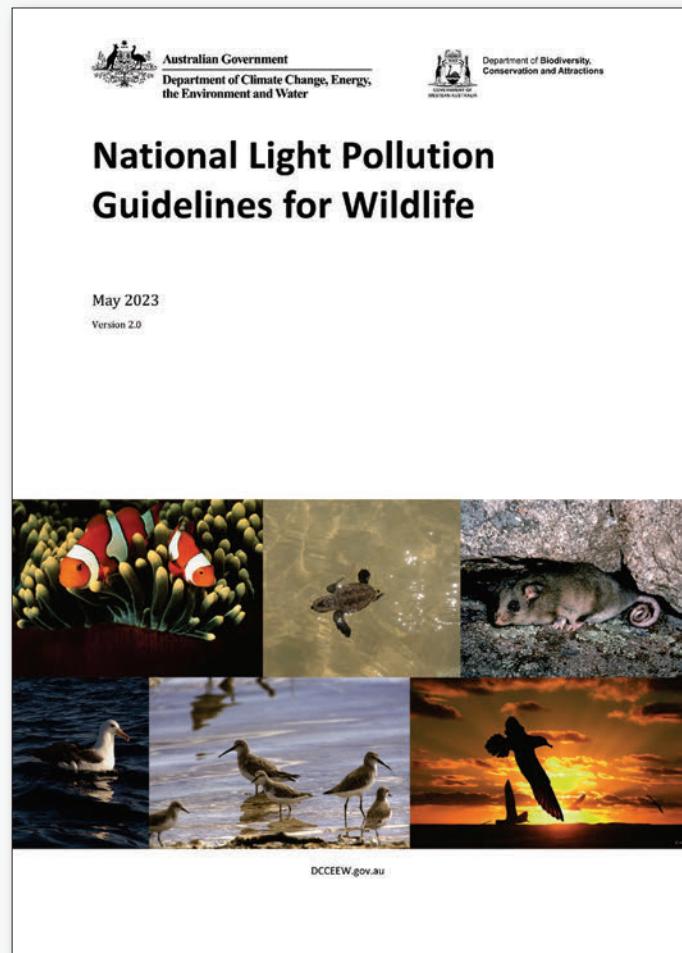
Consultante au cabinet « Pendoley Environmental » en biologie des tortues marines et modélisation et impacts de la pollution lumineuse.

Résumé

L'introduction pose un constat simple mais encore mal connu : l'obscurité naturelle est une ressource écologique aussi essentielle que l'eau propre, l'air ou les sols. Pourtant, elle disparaît rapidement. La lumière artificielle nocturne augmente chaque année à l'échelle mondiale, et probablement plus vite qu'on ne l'imagine. Ce phénomène touche de nombreuses espèces animales, car elles ne perçoivent pas la lumière comme les humains. Beaucoup sont extrêmement sensibles aux longueurs d'onde courtes, comme le bleu ou l'ultraviolet, ce qui rend les éclairages modernes particulièrement perturbants.

Cette pollution lumineuse peut modifier en profondeur le comportement ou la physiologie des animaux. Des exemples concrets sont rappelés : des bébés tortues marines incapables de trouver la mer lorsqu'une plage est éclairée ; des jeunes oiseaux marins qui ne parviennent pas à prendre leur premier envol si la nuit ne tombe jamais vraiment ; des marsupiaux dont la reproduction est retardée par l'exposition à la lumière ; des poissons et invertébrés affectés dans leur croissance ou leur cycle de vie. Ces dérèglements peuvent empêcher la croissance d'une population déjà fragile ou même empêcher un animal d'accomplir des migrations cruciales pour sa survie.

Pour autant, la lumière artificielle joue un rôle réel dans la sécurité, la mobilité ou les activités humaines. Les directives australiennes ne cherchent pas à opposer protection de la nature et sécurité des personnes. Elles invitent au contraire à trouver des solutions créa-



tives permettant de concilier les deux. L'idée centrale est que tout projet impliquant une lumière visible de l'extérieur — bâtiment, route, infrastructure industrielle, éclairage public ou même installation privée — doit se demander si cette lumière peut perturber la faune.

Les lignes directrices proposent ainsi une démarche pragmatique plutôt que des limites strictes. La technologie évolue trop vite, et les réactions des espèces à la lumière varient trop selon les milieux, les saisons ou les comportements. L'objectif est donc d'adopter une approche par résultats : réduire au maximum les perturbations pour que les animaux puissent continuer à se reproduire, se déplacer, s'alimenter et occuper leurs habitats.

Les pages suivantes expliquent comment utiliser ces directives. Elles offrent aux professionnels comme aux collectivités, urbanistes, entreprises ou particuliers un ensemble d'outils théoriques et pratiques : comprendre comment les animaux perçoivent la lumière, connaître les impacts connus, savoir quand une évaluation environnementale est nécessaire, et appliquer des principes de conception d'éclairage qui préservent l'obscurité sans compromettre la sécurité humaine.

Enfin, l'introduction souligne que la gestion de la lumière est devenue un enjeu juridique. De nombreuses espèces affectées par l'éclairage sont protégées au niveau national ou local, et certains territoires ou habitats sensibles doivent faire l'objet d'une attention particulière. Les directives s'accompagnent donc d'un cadre réglementaire précis, de références à la législation environnementale australienne et d'incitations à consulter les collectivités, les autorités compétentes et les connaissances scientifiques les plus récentes.

Dans son ensemble, cette introduction établit une idée forte : la lumière artificielle n'est pas un simple outil neutre du quotidien, mais un facteur de transformation majeure des écosystèmes nocturnes. Bien gérée, elle peut préserver la biodiversité tout en répondant aux besoins humains. Mal maîtrisée, elle contribue silencieusement au déclin d'espèces déjà menacées.

Principaux atouts de ce rapport

Ce rapport se distingue nettement par la qualité de ses apports scientifiques, qu'il s'agisse des effets de l'éclairage artificiel sur le vivant ou des dimensions plus opérationnelles, comme les techniques de mesure de la lumière. Les propositions d'action y sont également présentées de manière précise et concrète, offrant une véritable boîte à outils pour la gestion de la pollution lumineuse.

Après une synthèse introductory d'une dizaine de pages rappelant les principaux effets de la lumière artificielle nocturne sur la faune et la flore, le document s'enrichit d'annexes particulièrement riches. Celles-ci couvrent des aspects techniques et pratiques, ainsi que des considérations détaillées sur certains groupes d'espèces. Même si nombre d'exemples concernent des espèces australiennes, les analyses restent pleinement transposables à des taxons présents en France métropolitaine, tant les mécanismes écologiques en jeu sont similaires.

* * *

Artificial Light at Night: State of the Science 2023

Lumière artificielle nocturne : état des connaissances scientifiques 2023

Rapport édité par l'association
DarkSky International

Auteur

J. Barentine

Institution d'affiliation du premier auteur

Consultant dans le domaine de l'astronomie et la défense du ciel nocturne.

Résumé

Le rapport ALAN: *State of the Science 2023* propose une synthèse accessible et très complète des connaissances actuelles sur la lumière artificielle nocturne (ALAN). Il rappelle dès l'introduction que la pollution lumineuse augmente rapidement partout sur Terre, comme le montrent à la fois les observations satellitaires et citoyennes indiquant une hausse d'environ 10 % par an de la luminosité du ciel entre 2011 et 2022. La lumière artificielle est désormais reconnue comme une pollution environnementale à part entière, aux effets multiples sur les écosystèmes, la santé, la sécurité, le climat et même la justice sociale.

La première section porte sur le ciel nocturne et décrit comment la lumière émise par les villes se disperse dans l'atmosphère pour produire le *skyglow*, un halo lumineux qui efface progressivement les étoiles. La combinaison des éclairages modernes, des matériaux réfléchissants et des conditions météo amplifie ce phénomène. Les pages 2 et 3 montrent comment la transition mondiale vers les LEDs modifie profondément le spectre : les LEDs blanches émettent davantage de lumière bleue, très efficace pour éclaircir le ciel même avec une intensité modérée. Le rapport souligne également le phénomène de références glissantes : chaque génération s'habitue à voir moins d'étoiles que la précédente.

La deuxième section présente l'état des connaissances sur la faune et les écosystèmes. L'ALAN perturbe au moins 160 taxons — oiseaux, poissons, mammifères, amphibiens, insectes, plantes — avec des effets observés à toutes les échelles, des comportements individuels aux dynamiques de populations. Les pages 4 et 5 montrent comment la lumière artificielle modifie la synchronisation des cycles biologiques, les périodes d'alimentation, la reproduction ou encore l'orientation nocturne, notamment chez les espèces dépendantes du clair de lune ou des étoiles. Le document souligne aussi que les anomalies lumineuses altèrent les relations entre espèces, fragmentent les habitats et modifient les chaînes alimentaires, y compris dans les milieux aquatiques où les effets sont mesurables à plusieurs centaines de mètres de profondeur.

La troisième section traite de la santé humaine. Le rapport rassemble de nombreuses études montrant que l'exposition à la lumière nocturne perturbe le sommeil, dérègle les rythmes circadiens et peut être associée à des effets sur la santé mentale, métabolique ou

Artificial Light at Night: State of the Science 2023

DarkSky International

DOI: 10.5281/zenodo.8071915

This briefing summarizes the current state of knowledge about how the widespread and growing use of artificial light at night interacts with six key topics: the night sky (Section 1); wildlife and ecology (Section 2); human health (Section 3); public safety (Section 4); mental health and climate change (Section 5); and social justice (Section 6). It also includes a discussion of the emerging threat from light pollution caused by objects orbiting the Earth (Section 7). It concludes with a discussion of the knowledge gaps that exist within these topics and the research questions whose answers can fill the gaps (Section 8). It is intended to be useful to those seeking to broaden their understanding of the research on the causes and consequences of artificial light at night.

Introduction

Light pollution is surging in both its presence and reach across the globe (1–3). It is the source of both harm and potential harm to the night-time environment (4–5), and is also generally recognized as a form of environmental pollution (6). Scientific studies suggest the over-use of artificial light at night (henceforth 'ALAN') is the main source of light pollution (7, 8). The main challenge they identify is how to maximize the human benefits of ALAN while limiting its potentially negative social and environmental impacts (9–11).

1 The Night Sky

Light emitted into the night sky makes it difficult to see the stars. On the ground, ALAN makes the nighttime environment brighter. Weather changes like clouds and snow on the ground can make this impact worse. New and inexpensive light sources like white light-emitting diodes (LEDs) have a growing impact on both the night sky and outdoor spaces at night.

The most immediate symptom of light pollution is the phenomenon of 'skyglow'. It brightens the night sky in and near cities where large installations of outdoor lighting are installed. The lower layers of the Earth's atmosphere scatter light emitted near the ground. Some of that light escapes the atmosphere where Earth-orbiting satellites detect it (12), but many light rays encounter molecules and small particles in the atmosphere. These interactions redirect the paths of some of the light rays back down to the ground. Observers there see

light appearing to come from the night sky itself; see Figure 1. Skyglow competes with the faint light of astronomical objects in the night sky. It lowers the contrast between those objects and the background sky, making it difficult to observe them (13). There are currently no absolute metrics to characterize light pollution in wide use among researchers and practitioners (14, 15).

A slow but steady rise in skyglow in much of the world leads to gradually degraded visibility of the natural night sky and a transformation of outdoor spaces. Such a situation, changing slowly over decades, may go unnoticed due to a psychological effect known as a 'shifting baseline' (16). This applies to various aspects of artificial light on a 'normal' night: the number of visible stars, the amount of artificial light associated with perceptions of safety, and the experience of using non-visual senses such as hearing and balance. Along with other effects, the loss of the night sky is barely noticed.



Figure 1. The streetlight at left emits light in many different directions. Some of the light rays travel upward into the sky and pass through Earth's atmosphere (2). Some rays travel directly to the ground (3). Some rays are scattered by molecules and small particles in the atmosphere (4). Some rays are reflected off the ground back into the sky where they are seen by satellites (5). Lastly, some rays scatter into astronomical telescopes (5), blurring their view of the universe. Credit: ICIA.

Researchers have also studied both the sources of light pollution and the means of reducing its influence. In many places, publicly owned sources of light contribute most to the brightness of the night sky, especially in the earlier hours of night (17–19). Certain approaches, such as shielding light fixtures and reducing their intensity, seem to have the greatest benefit in terms of decreasing skyglow (20, 21).

hormonale. Les pages 19 et 20 évoquent notamment des recherches en milieu hospitalier révélant que la lumière en continu ralentit la récupération des patients, en particulier en soins intensifs.

La quatrième section aborde la sécurité publique. Contrairement à une croyance répandue, les données scientifiques ne permettent pas d'affirmer qu'un éclairage plus intense réduit systématiquement la criminalité ou les accidents. Le rapport met en avant l'absence d'études robustes sur ce point et insiste sur la nécessité de mieux comprendre les paramètres techniques — intensité, couleur, uniformité, directionnalité — pour concilier visibilité et sobriété.

La cinquième section se concentre sur l'énergie et le climat. Si les LED sont plus efficaces que les anciennes lampes, leur faible coût provoque souvent un « effet rebond » : on éclaire davantage, ce qui peut annuler les économies attendues. L'impact réel sur les émissions de gaz à effet de serre dépend donc des pratiques de conception de l'éclairage, de l'usage des dispositifs de gradation et d'une limitation stricte aux besoins réels. Le rapport invite à repenser la notion d'efficacité lumineuse pour y intégrer les impacts sur le ciel, la biodiversité et la santé.

La sixième section traite de justice sociale. Les données montrent que les communautés pauvres ou racisées sont souvent davantage exposées à la lumière intrusive, à l'éblouissement ou à des éclairages de mauvaise qualité. Plusieurs études nord-américaines mettent en évidence des liens entre ségrégation urbaine et inégalités d'exposition à l'ALAN, posant la question d'un accès équitable à l'obscurité.

La septième section analyse une source émergente de pollution lumineuse : celle générée depuis l'espace. Les constellations de satellites, comme Starlink, modifient déjà l'apparence du ciel et posent de graves défis à l'astronomie. Le rapport rappelle que plusieurs dizaines de satellites peuvent être visibles à l'œil nu depuis un même lieu, et que leur contribution à la luminosité diffuse du ciel pourrait rivaliser, d'ici 2030, avec celle des lumières terrestres. Les pages 11 et 12 incluent une simulation montrant comment des milliers de satellites pourraient éclaircir le ciel globalement, même lorsqu'ils ne sont pas visibles individuellement. Les enjeux sont également juridiques et géopolitiques.

Enfin, la huitième section identifie les principales lacunes scientifiques : seuils de sensibilité propres à chaque espèce, effets cumulés du *skyglow* sur les écosystèmes, liens de causalité entre ALAN et certaines maladies humaines, impacts des politiques publiques, ou encore capacité maximale de satellites que l'orbite terrestre peut supporter sans dégrader durablement le ciel nocturne. L'auteur appelle à des recherches véritablement interdisciplinaires, mobilisant écologie, urbanisme, santé, astronomie, droit, sociologie et ingénierie.

Dans l'ensemble, le rapport montre que l'ALAN est désormais une pression environnementale majeure, comparable au bruit, aux polluants chimiques ou à la fragmentation des habitats. Protéger la nuit n'implique pas de renoncer à l'éclairage, mais de repenser son usage selon un principe simple : fournir la bonne lumière, au bon endroit, au bon moment, et seulement lorsqu'elle est nécessaire. Le rapport constitue ainsi un outil de référence pour comprendre et réduire les impacts de la pollution lumineuse.



Photographie : David Loose





Photographie : David Loose



Photographie : David Loose

L'OBSEVATOIRE DE L'ENVIRONNEMENT NOCTURNE DU CNRS

Site web : <https://observatoire-environnement-nocturne.cnrs.fr>

L'environnement nocturne est devenu, en quelques années, un enjeu scientifique, social et politique majeur. Alors que l'obscurité naturelle décline à un rythme inédit, l'Observatoire de l'environnement nocturne (OEN) du CNRS analyse les mutations des nuits contemporaines et accompagne leur gouvernance. Espace de recherche interdisciplinaire, il mobilise la géographie, l'écologie, la physique de l'atmosphère, les sciences de l'ingénieur et sciences sociales pour comprendre ce que produit, sur les milieux et les territoires, l'extension continue de la lumière artificielle. L'OEN s'appuie sur un ensemble articulé d'instruments et de méthodes : capteurs photométriques, suivis écologiques, mesures acoustiques, enquêtes de terrain, travaux en aménagement, en géographie et en économie de l'environnement, nourris par de nombreux partenariats institutionnels. Cette configuration lui permet de documenter, avec une résolution spatiotemporelle rare, l'évolution de la pollution lumineuse en France et ailleurs, en croisant données physiques, observations écologiques, paysages sonores, contextes territoriaux et dimensions socio-économiques.

Car il s'agit autant de mesurer que d'interpréter : comprendre comment les intensités lumineuses se déploient dans l'espace, comment elles affectent les rythmes biologiques, les paysages nocturnes, les pratiques humaines, et comment elles reconfigurent notre rapport collectif à la nuit. La donnée n'est jamais une fin en soi ; elle devient un support pour interroger nos manières d'habiter, d'aménager et de réguler. Ce souci d'articuler métriques scientifiques, récits territoriaux et enjeux de gouvernance constitue l'une des forces distinctives de l'Observatoire.

L'OEN occupe également une place singulière dans les débats publics et les arènes institutionnelles. Ses travaux contribuent à informer les politiques d'aménagement, les stratégies de sobriété lumineuse et les dispositifs de conservation de la biodiversité. En mettant en évidence la diversité des effets de la lumière artificielle — qu'ils soient écologiques, culturels, sanitaires ou sociaux — l'OEN aide à dépasser les visions strictement technicistes pour replacer la nuit au cœur des dynamiques territoriales. La nuit n'y est jamais réduite à un simple intervalle temporel : c'est un milieu, un paysage, un espace d'expérience, doté d'épaisseurs écologiques et symboliques qui conditionnent nos relations au vivant et au territoire.

Enfin, l'Observatoire se veut un lieu de mise en culture de la nuit. Par des collaborations avec des collectivités, des parcs, des associations, des artistes et des acteurs de l'éclairage, il contribue à réhabiliter une sensibilité à l'obscurité et à ouvrir des imaginaires de gestion qui ne se limitent pas à la seule réduction des nuisances. Comprendre la nuit, c'est aussi reconnaître ce qu'elle permet : des continuités écologiques, des expériences sensibles singulières, des formes de relation au monde qui échappent au régime diurne de la visibilité totale.

À la croisée de la production de connaissances, de l'expertise publique et de la transformation des pratiques, l'OEN incarne une manière renouvelée de faire science : située, ouverte, engagée dans la fabrication collective de territoires plus habitables — pour les humains comme pour les autres vivants.







LE DÉFI CLÉ OCCITANIE BIODIVOC

Site web : <https://biodivoc.edu.umontpellier.fr>

Les changements planétaires en cours, résultat des activités humaines, affectent l'ensemble des composantes de l'environnement et engendrent une érosion de la biodiversité à un rythme alarmant, jamais observé précédemment. Tous les espaces sont touchés, en particulier les plus riches en biodiversité comme l'Occitanie.

Situé au carrefour de quatre influences bioclimatiques (atlantique, méditerranéenne, montagnarde et continentale), l'Occitanie possède un patrimoine naturel unique et figure parmi les 36 points chauds de biodiversité à l'échelle mondiale.

Elle est aussi la région métropolitaine démographiquement la plus dynamique. Ses métropoles croissent rapidement, et la pression démographique est particulièrement forte sur le littoral. Ce dynamisme affecte fortement la biodiversité et pose des problèmes majeurs, en particulier en termes de consommation et de gestion des ressources naturelles, vivantes ou non.

Les aspects les plus marquants des changements planétaires à l'échelle régionale, au-delà d'un réchauffement climatique particulièrement marqué sur le pourtour méditerranéen, sont l'altération de la biodiversité par la modification de l'usage des milieux (continentaux et marins), incluant un morcellement et une artificialisation des espaces, et l'arrivée d'espèces exotiques posant notamment des problèmes de santé, en particulier humaine.

Or la biodiversité est un bien commun qui constitue à la fois le fondement des services rendus par la nature dont dépendent les sociétés humaines et la ressource essentielle permettant de développer des solutions aux changements globaux. Son érosion a donc des répercussions évidentes aux niveaux écologique, économique et social.

Anticiper les réponses de la biodiversité aux changements planétaires et mitiger leurs effets à l'échelle régionale est donc une problématique centrale en Occitanie, si on veut maintenir attractivité et qualité de vie.

C'est pourquoi, depuis 2021 la Région Occitanie s'appuie, au travers du Défi Clé BioDivOc, sur une recherche fondamentale forte menée par la communauté régionale en écologie et évolution, première au niveau national, dont l'excellence scientifique et les diversités d'approches contribuent à apporter une réponse dans le cadre d'une politique plus efficiente.

L'objectif est de comprendre la dynamique et l'adaptation de la biodiversité dans des environnements changeants, du niveau des gènes à celui de l'écosystème et des paysages, en prenant pleinement en compte les interactions Homme-nature. Pour y parvenir BioDivOc soutient des projets de recherche ancrés sur le territoire selon une approche globale toutes espèces et tous écosystèmes confondus, mêlant observation, expérimentation et théorie. Par ses actions de recherche et d'animation scientifique, BioDivOc vise à favoriser une recherche plus intégrée, dans une approche à la fois inter- et transdisciplinaire, développant les liens entre science fondamentale, gestion de la biodiversité et Science & société.

Ce rapport a été financé par le
Défi Clé Occitanie BiodivOc



Une réalisation de l'Observatoire de
l'environnement nocturne du CNRS

