

> comme la région préfrontale des mammifères, une zone de convergence des entrées sensorielles et des commandes sortantes du système moteur. De plus, comme le cortex préfrontal, le nidopallium caudolatéral joue un rôle critique dans toutes les tâches cognitives, et ses neurones codent des fonctions telles que la prise de décision et l'attribution de valeurs à diverses options avant qu'un choix ne soit fait.

Bien que le nidopallium caudolatéral et le cortex préfrontal des mammifères aient des fonctions semblables, les indices génétiques et leur emplacement (à l'arrière du pallium pour le premier et à l'avant du cerveau pour le second) suggèrent que ces deux régions ne proviennent pas d'un centre cérébral commun aux oiseaux et aux mammifères... Au contraire, autrefois, elles avaient probablement des fonctions très différentes chez les premiers ancêtres des mammifères et des oiseaux, puis elles auraient convergé en quelque 300 millions d'années pour devenir des régions dédiées à l'intégration cognitive des entrées sensorielles avec les sorties motrices.

J'ai souvent pensé à la célèbre phrase du docteur Ian Malcolm dans *Jurassic Park*: «La vie trouve un chemin.» Si deux groupes d'animaux distincts ont tous deux désespérément besoin d'une région cérébrale orchestrant des fonctions cognitives de haut niveau, ils développent indépendamment l'un de l'autre une région de type préfrontal.

Pour explorer comment une physiologie et une structure différentes finissent par fournir des fonctions cognitives identiques, Murray Shanahan, de l'Imperial College de Londres, moi-même et d'autres collègues avons examiné l'organisation du connectome, à savoir l'ensemble des connexions cérébrales, du pallium du pigeon. Nous avons ainsi montré qu'il est très similaire à celui des mammifères. D'où le message suivant: si deux groupes d'animaux développent des fonctions mentales semblables au cours de leur évolution, c'est qu'ils possèdent également les mêmes réseaux de connectivité cérébrale.

DAVANTAGE DE NEURONES AU MILLIMÈTRE CARRÉ

Mais une question reste en suspens: comment les oiseaux disposent-ils de telles aptitudes cognitives avec un cerveau si petit, et donc certainement peu de neurones et de connexions? Seweryn Olkowicz et Pavel Němec, de l'université Charles, à Prague, en République tchèque, et Suzana Herculano-Houzel, de l'université Vanderbilt, aux États-Unis, ont estimé le nombre de neurones de 28 espèces d'oiseaux. Surprise: leur cerveau, en particulier celui des corvidés et des perroquets, contient deux fois plus de neurones que sa taille le laissait supposer. Et comme ce surplus se trouve surtout dans

Alex le perroquet était capable de catégoriser des objets, des actions et des quantités numériques

le pallium, les corvidés et les perroquets disposeraient d'une plus grande puissance de calcul que certains singes au cerveau plus gros.

Mais même avec plus de neurones que prévu, les oiseaux en ont encore beaucoup moins que les mammifères, étant donné la toute petite taille de leur cerveau... Par exemple, les nestors kéas (des perroquets endémiques de Nouvelle-Zélande) disposent de 1,28 milliard de neurones palliaux, les corbeaux de 1,2 milliard, tandis que les chimpanzés en ont 7,4 milliards... pour des aptitudes cognitives, rappelons-le, presque semblables. En réalité, une plus grande densité de neurones engendre une diminution des distances de communication entre eux. Dans les tâches où l'information est transmise de façon répétée entre des groupes de neurones dans un cerveau dense, il en résulte un gain de temps, car les signaux passent plus rapidement d'un réseau à un autre. De fait, Sara Letzner et Christian Beste, de l'université technique de Dresde, en Allemagne, et moi avons montré que les pigeons réagissent parfois plus rapidement que les humains lors de certaines tâches cognitives.

Ainsi, indépendamment les uns des autres, les oiseaux et les mammifères se sont répandus à travers le monde en conquérant presque toutes les niches écologiques où des vertébrés peuvent vivre. Des capacités cognitives élevées ont été nécessaires pour trouver rapidement des solutions à des problèmes nouveaux et pour surpasser les concurrents. De sorte que la forte pression de sélection dans les deux classes de vertébrés a produit des aptitudes cognitives considérables et semblables. Certes, les oiseaux et les mammifères ont emprunté des chemins différents – les premiers ont «densifié» leurs neurones, les seconds ont augmenté la taille de leur cerveau –, mais ils ont développé des mécanismes neuronaux et des modes de pensée similaires. Pour une «cervelle d'oiseau» finalement plus proche qu'on ne le croyait de celle des grosses têtes. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Kabadayi et al., **Ravens parallel great apes in flexible planning for tool-use and bartering**, *Science*, vol. 357, pp. 202-204, 2017.

O. Güntürkün et T. Bugnyar, **Cognition without cortex**, *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 20, pp. 291-303, 2016.

D. Scarf et al., **Orthographic processing in pigeons (*Columba livia*)**, *PNAS*, vol. 113, pp. 11272-11276, 2016.

A. H. Taylor et al., **New caledonian crows reason about hidden causal agents**, *PNAS*, vol. 109, pp. 16389-16391, 2012.

J. Holzhaider et G. Hunt, **Rusé comme... un corbeau**, *Pour la Science*, n° 324, pp. 46-51, octobre 2004.

Les méfaits de la pollution lumineuse

Les endroits où l'obscurité de la nuit reste préservée se font de plus en plus rares. Or la lumière artificielle nocturne perturbe de plusieurs façons la vie des animaux... au point de contribuer à l'érosion générale de la biodiversité.

Dès que le jour faiblit, le micro-cébe murin, un petit lémurien nocturne de Madagascar, voit sa température corporelle augmenter de plusieurs degrés tandis que l'animal se met à rechercher activement de la nourriture. C'est un exemple parmi bien d'autres : les animaux et les plantes vivent au rythme de l'alternance du jour et de la nuit. Plus généralement, la lumière et la luminosité ambiante ont sur les espèces vivantes une grande influence. Nombre de processus physiologiques, de comportements, d'interactions au sein des écosystèmes dépendent de la lumière et de ses cycles journaliers ou saisonniers.

Quand on évoque les effets de la lumière naturelle sur le vivant, on pense le plus souvent à la lumière solaire. Cependant, la nuit, d'autres sources de lumière naturelle, à savoir la Lune et les étoiles, peuvent influencer sur les comportements. Tel est le cas avec les tortues marines venant d'éclore sur une plage la nuit. Ces nouveau-nés se servent de leur vision pour se diriger vers l'océan, l'horizon aquatique

renvoyant plus de lumière que la partie terrestre : c'est grâce à leur capacité à déceler la faible différence d'illumination entre les deux côtés de leur plage de naissance que les tortues marines s'orientent convenablement à ce moment crucial de leur vie !

Or depuis une centaine d'années, l'obscurité de la nuit est de plus en plus altérée par l'éclairage artificiel, qui se développe dans son intensité comme dans son étendue géographique. Cette généralisation de la lumière artificielle nocturne soulève une question centrale : dans quelle mesure perturbe-t-elle les organismes vivants, leurs populations et leurs interactions ?

Les premiers signes préoccupants sont apparus il y a déjà longtemps. Par exemple, en Amérique du Nord, on a constaté dès les années 1920 une mortalité massive d'oiseaux à proximité des phares maritimes. Par ailleurs, les astronomes ont alerté dès les années 1970 sur l'expansion de la lumière artificielle nocturne, qui gêne leurs observations. Mais il a fallu attendre la dernière décennie pour que les scientifiques prennent la mesure du >

L'ESSENTIEL

> La nuit, la lumière d'origine artificielle est de plus en plus présente, même dans des régions éloignées des grandes agglomérations.

> Les impacts de cette pollution lumineuse sur la faune n'ont commencé à être étudiés que récemment.

> La lumière artificielle nocturne perturbe des

mécanismes hormonaux, les comportements des animaux, leurs interactions, leur orientation... Elle est probablement un facteur important de déclin de la biodiversité.

> Pour la limiter, plusieurs voies d'action sont possibles.

LES AUTEURS



EMMANUEL DESOUHANT
professeur à l'université Lyon-1, chercheur au Laboratoire de biométrie et biologie évolutive

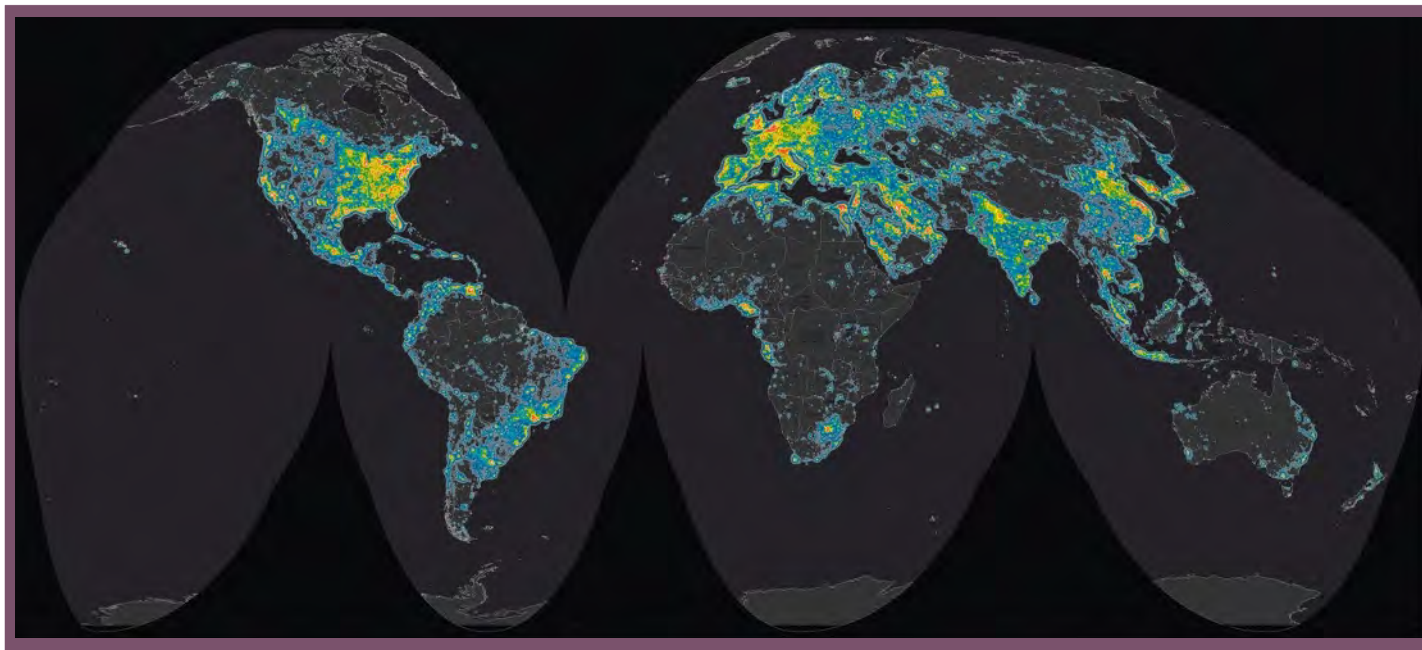


THIERRY LENGAGNE
chargé de recherche du CNRS au Laboratoire d'écologie des hydrosystèmes naturels et anthropisés, à l'université Lyon-1



NATHALIE MONDY
maîtresse de conférences à l'université Lyon-1, chercheuse au Laboratoire d'écologie des hydrosystèmes naturels et anthropisés

La lueur des agglomérations urbaines (ici Tarbes, vue de l'observatoire du pic du Midi de Bigorre), en étant diffusée par l'atmosphère et les nuages, crée un halo lumineux, ou *skyglow*, qui est perceptible jusqu'à plusieurs dizaines, voire centaines de kilomètres de distance. Cette pollution lumineuse affecte donc des milieux naturels même éloignés.



> phénomène et s'intéressent de près à ses conséquences sur la faune, voire sur la flore. Depuis, les études se multiplient, et nous présenterons ici quelques-uns de leurs résultats. Au-delà de l'impact de la lumière artificielle nocturne sur les espèces vivant en ville, l'enjeu actuel des recherches consiste à comprendre les effets, sur la biodiversité, des faibles intensités lumineuses présentes dans les milieux naturels distants des centres urbains.

UN NOUVEL ACTEUR ENVIRONNEMENTAL

La lumière artificielle nocturne provient des activités humaines et des éclairages variés que nos sociétés ont mis en place : lampadaires urbains et routiers, phares des véhicules, panneaux publicitaires, éclairages domestiques et des lieux de travail... Ces éclairages directs, localisés, engendrent aussi un éclairage indirect et plus diffus, de faible puissance mais ayant une forte empreinte spatiale : c'est l'origine du halo lumineux, ou *skyglow*, créé par la lumière des agglomérations et visible dans le ciel jusqu'à plusieurs dizaines, voire centaines, de kilomètres de la zone ciblée par les éclairages directs. Un halo lumineux que certaines conditions atmosphériques, telles qu'une couverture nuageuse, accentuent en favorisant la diffusion de la lumière.

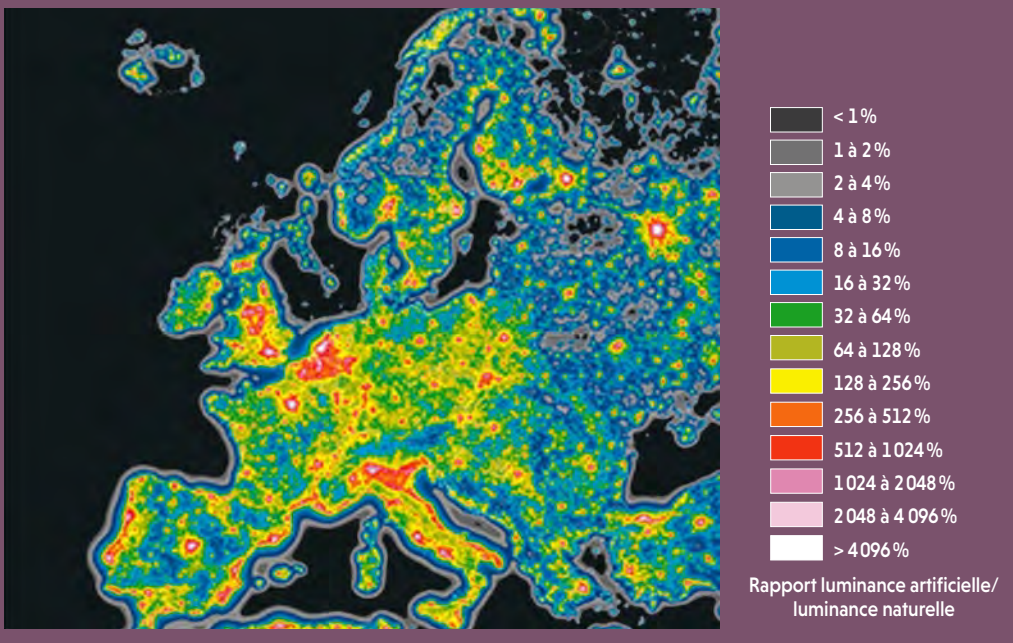
L'intensification des éclairages avec le développement de l'urbanisation constitue une nouvelle perturbation environnementale. L'expansion de la lumière artificielle nocturne est rapide, les superficies touchées s'accroissant d'environ 6% par an. En 2016, en tenant compte de la diffusion du halo lumineux, environ 23% de la surface totale des continents et

0,2% des surfaces océaniques étaient soumises à cette perturbation lumineuse.

Ces estimations ont été obtenues à partir de données satellitaires, qui ont permis à un groupe de physiciens réunis autour de Fabio Falchi, de l'Institut de science et technologie de la pollution lumineuse, à Thiene, en Italie, de réaliser un atlas mondial de la lumière artificielle nocturne (sa dernière version a été publiée en 2016).

Les données rassemblées par ces chercheurs montrent par exemple que l'intensité lumineuse nocturne en Europe varie d'un facteur 6800 entre la région la moins polluée par la lumière artificielle et la plus polluée. Et qu'en France métropolitaine, il n'existe plus de zones où le ciel est vierge de pollution lumineuse, c'est-à-dire où la luminosité nocturne a augmenté de moins de 1% par rapport à la lumière naturelle. Cette situation n'est pas propre à la France métropolitaine, mais concerne la plupart des pays développés (*voir les cartes ci-dessus*) : les endroits où l'on peut profiter d'une nuit noire pour admirer la voûte céleste et la Voie lactée se font bien rares !

Outre l'apport de lumière pendant une période où les êtres vivants évoluent normalement dans l'obscurité, la lumière artificielle nocturne soumet ces organismes à des longueurs d'onde lumineuses différentes de celles provenant du Soleil, de la Lune ou des étoiles. Par exemple, les anciens lampadaires à vapeur de sodium ont un spectre d'émission plutôt étroit, dans l'orangé, tandis que les nouveaux dispositifs d'éclairage composés de diodes électroluminescentes (les LED à lumière blanche) ont un spectre d'émission large qui s'étend dans le bleu. De ce fait, les espèces



Ces cartes publiées en 2016 représentent par niveaux de couleur la brillance, ou luminosité, du ciel nocturne due à la lumière artificielle, rapportée à la luminosité naturelle (supposée être de 174 microcandelas par mètre carré). Le noir correspond à un rapport luminosité artificielle/luminosité naturelle inférieur à 1 %, le gris foncé à un rapport compris entre 1 et 2 %, puis la fourchette de rapports double d'une couleur à la suivante. Le blanc correspond à un rapport supérieur à 4 100 %. Dès que ce rapport dépasse environ 400 %, la Voie lactée n'est plus discernable...

vivantes sont exposées à des longueurs d'onde lumineuses peu ou jamais rencontrées pendant toute leur évolution, et l'on peut donc légitimement s'interroger sur leur capacité d'adaptation à ces nouvelles composantes.

LA MÉLATONINE, PRINCIPALE CIBLE HORMONALE

La lumière artificielle nocturne représente ainsi un nouveau facteur environnemental qui pose la question de la réaction et de l'adaptabilité, vis-à-vis de ce facteur, des animaux (dont les humains) et des végétaux.

La réponse à cette question suppose de savoir sur quoi agit la lumière artificielle nocturne. On sait aujourd'hui que, chez les animaux, elle perturbe les rythmes circadiens qui régulent la chronologie de diverses activités telles que l'alimentation, la sexualité, la veille et le sommeil..., mais aussi le métabolisme énergétique. Par exemple, en 2018, Morgane Touzot, doctorante à l'université Lyon-1, a montré qu'une pollution lumineuse nocturne de 5 lux (voir le tableau ci-dessous) induit chez le crapaud commun (*Bufo bufo*), dès la première nuit d'exposition, une diminution drastique (-56 %) de l'activité locomotrice des mâles en période de reproduction, ainsi qu'une augmentation de leur métabolisme énergétique de base (+28 %).

Ces rythmes circadiens dépendent d'un ensemble de gènes dont le fonctionnement est

largement modulé par une hormone, la mélatonine. Or celle-ci est la principale cible hormonale de l'éclairage artificiel nocturne. La mélatonine est généralement sécrétée la nuit par la glande pinéale, dans le cerveau, sa synthèse à partir d'un acide aminé (le tryptophane) étant inhibée par la lumière le jour. Même si la durée et l'intensité de libération de cette hormone varient selon les espèces, la sécrétion de mélatonine reflète la longueur de la nuit et est donc un marqueur de la photopériode, c'est-à-dire de la durée de l'éclairage du jour.

Par exemple, en 2016, l'équipe de Marcel Visser, à l'Institut d'écologie des Pays-Bas, a révélé que la production de mélatonine est supprimée ou diminuée chez des mésanges charbonnières exposées à une lumière nocturne variant de 0,05 à 5 lux. On retrouve des résultats similaires chez de nombreux oiseaux et mammifères, comme le wallaby de l'île Eugène (*Macropus eugenii*), un petit marsupial nocturne du sud de l'Australie, et chez certains poissons comme la perche soleil (*Lepomis gibbosus*).

Détaillons un peu le cas du wallaby de l'île Eugène. Chez cette espèce très sensible à la longueur du jour, la naissance des jeunes est synchronisée par la lumière naturelle et a lieu la sixième semaine après le solstice d'été. Or dans une étude publiée en 2015 par Kylie Robert, de l'université La Trobe, à Melbourne ➤

Les valeurs de l'éclairage (intensité lumineuse reçue par unité de surface) associé à quelques sources de lumière naturelles et artificielles. L'éclairage est exprimé en lux, sachant que 1 lux correspond à une intensité lumineuse de 1 lumen reçue sur 1 mètre carré. (À titre indicatif, une LED de 4,5 watts, à usage domestique, a un flux lumineux d'environ 500 lumens.)

Plein soleil	Partiellement ensoleillé	Ciel nuageux en journée	Habitations (intérieur)	Lampadaires urbains (routes)	Lampadaires urbains (zones résidentielles)	Plein lune (conditions claires)	Halo lumineux (skyglow)	Nuit étoilée (sans lune)
103 000	50 000	1 000 - 10 000	100 - 300	~10 - 40	5 - 10	0,3	~ 0,15	~ 0,001

> (Australie), et ses collègues, la comparaison de deux populations de la côte est de l'Australie (l'une exposée à de la lumière artificielle nocturne, l'autre non) a révélé un retard de un mois du pic de naissances chez les animaux de la zone polluée par la lumière. La croissance de l'embryon est normalement liée à de tout petits changements de la durée de la nuit, de l'ordre de six minutes, changements que les animaux ne peuvent plus percevoir dans les zones où sévit la pollution lumineuse. Comme chez toutes les espèces animales, les naissances sont souvent en phase avec le pic d'abondance de nourriture, et un décalage temporel trop important a généralement des conséquences graves sur la survie des jeunes et le maintien des populations.

L'impact biologique de la lumière artificielle nocturne dépend de son intensité, mais aussi des longueurs d'onde auxquelles sont exposés les animaux. Selon les travaux menés ces dernières années par Jenny Ouyang, de l'université du Nevada, et ses collègues, les longueurs d'onde courtes et moyennes comme le bleu (produites par les LED blanches), induisent chez les humains, les rongeurs, les oiseaux et les poissons une plus forte réduction de la synthèse de mélatonine que les grandes longueurs d'onde comme le orange-rouge.

UNE NOUVELLE FORME DE PERTURBATEUR ENDOCRINIEN

Une perception altérée de la longueur du jour a un impact important sur la reproduction saisonnière *via* une dérégulation de la production d'hormones sexuelles. Chez de nombreuses espèces, la longueur du jour constitue un signal pour le démarrage de l'activité reproductrice au printemps. En augmentant la durée perçue du jour, la lumière artificielle nocturne a pour conséquence d'avancer le début de leur saison de reproduction. C'est ce que l'on constate chez de nombreux oiseaux vivant dans des zones urbaines, par rapport à leurs congénères des zones rurales.

Au début des années 2010, afin d'évaluer les effets à long terme de l'exposition chronique à la lumière artificielle nocturne, Davide Dominoni et ses collègues de l'institut Max-Planck d'ornithologie, en Allemagne, ont soumis des merles à une faible intensité lumineuse nocturne (0,3 lux) en continu pendant deux ans. Au cours de la première année, les merles exposés à cette lumière présentaient un cycle gonadique fonctionnel, mais plus précoce que chez les oiseaux témoins. La deuxième année, leur appareil reproducteur ne s'est pas développé : la taille des testicules et la concentration de testostérone étaient au même niveau que celles enregistrées hors saison de reproduction.

Ainsi, la lumière artificielle nocturne affecte le fonctionnement de plusieurs systèmes



endocriniens et, à ce titre, on peut la considérer comme une nouvelle forme de « perturbateur endocrinien ». Elle peut même provoquer, directement ainsi que *via* la modification du patron de sécrétion de la mélatonine, une sécrétion accrue d'hormones de stress (des glucocorticoïdes) chez les vertébrés.

Jenny Ouyang et ses collègues ont observé ce phénomène en 2015 chez des poussins de mésanges charbonnières élevés en milieu naturel avec de la lumière blanche la nuit, que les chercheurs comparaient à des poussins élevés sans lumière nocturne ou avec de la lumière verte ou rouge. Or une augmentation chronique du taux de glucocorticoïdes induit généralement une diminution des défenses immunitaires, bien que cet aspect n'ait pas été étudié chez les mésanges.

Le système immunitaire peut aussi être perturbé par d'autres voies. En exposant des grillons australiens *Teleogryllus commodus* à de la lumière nocturne, Joanna Durrant et ses collègues, de l'université de Melbourne, en Australie, ont en 2019 mis en évidence que l'immunité de ces insectes diminue. Pourtant, comme les autres insectes et arthropodes, ces grillons ne produisent pas de glucocorticoïdes. L'effet négatif de la pollution lumineuse sur l'immunité semble donc général, bien que les mécanismes en jeu restent à préciser.

La lumière nocturne modifie par ailleurs le comportement de nombreuses espèces animales. Certaines espèces sont attirées par la lumière (on parle de phototactisme positif), tandis que d'autres ont tendance à la fuir. Les espèces à phototactisme positif sont particulièrement vulnérables face à la lumière artificielle nocturne. En effet, une fois attirées, elles sont piégées par la source lumineuse et ne

Les tortues marines (ici des caouannes, *Caretta caretta*) qui naissent la nuit sur une plage doivent rejoindre dans les plus brefs délais la mer. Pour se diriger, elles s'appuient sur la différence de luminosité entre la partie océanique et la partie terrestre de leur horizon, la surface de la mer réfléchissant davantage la faible lumière ambiante. La présence d'éclairages artificiels sur le littoral perturbe cette orientation.

parviennent plus à s'en éloigner. C'est notamment le cas des insectes.

Gerhard Eisenbeis, de l'université Johannes-Gutenberg, et Andreas Hänel, du muséum d'Osnabrück, en Allemagne, ont publié en 2009 leurs travaux montrant que les lampadaires classiques, équipés de lampe à vapeur de sodium, attiraient, dans le sud-ouest de l'Allemagne, en moyenne une centaine d'insectes par nuit durant l'été. Il s'agit essentiellement de diptères (mouches, moustiques...), de coléoptères et de lépidoptères (papillons de jour ou de nuit). Environ 30 à 40% des individus attirés meurent rapidement soit par la chaleur du contact avec la lampe, soit par déshydratation. Les autres restent le plus souvent piégés par la lumière, incapables de se nourrir ou de rechercher un partenaire pour la reproduction.

Pour se faire une idée de l'étendue des dégâts causés, prenons l'exemple de la France. D'après l'Association française de l'éclairage, il existe 9 millions de points lumineux d'éclairage public. Une simple multiplication indique alors qu'en un seul été, plus de 2 000 milliards d'insectes disparaissent à cause de l'éclairage public ! Et pour être complet, il faudrait ajouter tous les éclairages privés (vitrines, éclairages des particuliers, des sites industriels...). Ce chiffre, bien qu'approximatif, montre que

l'éclairage de nuit affecte de façon notable la biodiversité, puisque les insectes font souvent partie des premiers maillons de la chaîne alimentaire et qu'ils constituent la nourriture principale de nombreuses espèces de vertébrés, d'oiseaux en particulier, et d'autres arthropodes.

LES OISEAUX PIÉGÉS ET DÉSORIENTÉS

Les oiseaux aussi paient un lourd tribut à la pollution lumineuse. Alors que plus de la moitié des espèces migrent de nuit en utilisant la voûte céleste ou le champ géomagnétique pour s'orienter, la lumière artificielle nocturne altère leur comportement et interfère avec leur système d'orientation. Une étude publiée en 2017 par Benjamin Van Doren et ses collègues, du laboratoire Cornell d'ornithologie, aux États-Unis, le démontre. Ces chercheurs ont évalué, à l'aide de radars et de capteurs acoustiques, l'effet des deux faisceaux lumineux symbolisant les deux tours jumelles du World Trade Center, à New York. Ils ont estimé que ce monument mémoriel lumineux, nommé Tribute in Light, a « piégé » environ 1,1 million d'oiseaux lors des 49 jours de suivi (étalés entre 2008 et 2016) !

Beaucoup d'oiseaux s'épuisent à tourner en rond et un certain nombre d'entre eux tombent au sol ou finissent par percuter les bâtiments. L'organisation non gouvernementale Fatal Light Awareness Program a ainsi estimé que, chaque année, pour la seule ville de Toronto, au Canada, 1 à 10 millions d'oiseaux migrateurs périssent par collision avec les immeubles, les structures éclairées de nuit étant particulièrement meurtrières.

Enfin, plusieurs espèces utilisent la lumière présente naturellement la nuit pour s'orienter. C'est le cas de certains coléoptères, les bousiers, qui s'orientent grâce à la Voie lactée, ou des tortues marines, comme nous l'avons évoqué au début de l'article. Dans ces deux exemples, la pollution lumineuse perturbe l'orientation des animaux : les bousiers auront des difficultés à trouver leur source alimentaire et les tortues venant de naître tourneront le dos à la mer et se retrouveront sur les parkings et les routes du littoral, leurrées par la puissance des sources artificielles d'éclairage.

L'une des conséquences de la lumière artificielle nocturne et de la modification associée des comportements individuels est un changement dans les interactions des espèces. Grâce à leurs cycles de vie généralement courts, les insectes sont un groupe zoologique pour lequel cet aspect se prête à l'étude : on peut obtenir, sur une échelle de temps raisonnable, des informations sur la dynamique de leurs populations et le fonctionnement des communautés.

Les lampadaires de l'éclairage public tuent un nombre colossal d'insectes



> Selon l'intensité, la composition spectrale de l'éclairage et la sensibilité des organismes soumis à la lumière artificielle nocturne, certains groupes d'insectes subissent de plus forts risques de prédation en zones éclairées. Ainsi, en 1999, Astrid Heiling, de l'université de Vienne, en Autriche, a comparé le comportement de construction de toile des araignées *Larinioides sclopetarius*, communes près de l'eau et sur les ponts. De façon surprenante, ces arthropodes nocturnes préfèrent tisser leur toile dans des zones artificiellement éclairées, où elles capturent davantage d'insectes que dans les lieux sombres. De la même façon, des chercheurs ont montré qu'en induisant une plus grande abondance d'insectes près des lampadaires publics, la lumière artificielle nocturne a un fort impact sur les interactions des chauves-souris avec leurs proies et contribue à modifier la distribution spatiale des chiroptères, qui s'agrègent près des points lumineux.

DES COMMUNAUTÉS D'ESPÈCES CHAMBOULÉES

Au-delà de la distribution spatiale, la lumière artificielle nocturne affecte aussi la distribution temporelle des espèces. Ainsi, les espèces nocturnes se retrouvent en compétition avec des espèces diurnes qui prolongent leur activité sur une partie de la nuit artificiellement éclairée, ce qui peut affecter de façon durable la composition et le fonctionnement d'un ensemble d'espèces en interaction. Une étude parue en 2017 et conduite sur le terrain pendant trois ans par des chercheurs du groupe de Kevin Gaston, à l'université d'Exeter, en Angleterre, l'a démontré.

Elle a consisté à évaluer l'impact d'un éclairage artificiel nocturne, *via* des LED blanches, sur la structure et la composition en araignées et en coléoptères vivant dans et sur le sol. Les abondances relatives des espèces ont profondément changé par rapport aux conditions témoins, que ce soit pendant le jour ou la nuit et ce au cours des trois années. De plus, la densité d'individus des espèces prédatrices présentes sous les points d'éclairage était augmentée. Ces résultats montrent clairement que la lumière artificielle nocturne affecte les niveaux supra-individuels d'organisation du vivant, tels que les communautés (ensembles d'espèces en interaction).

Les populations de certaines espèces sont-elles réduites ou menacées par la pollution lumineuse? Les preuves directes d'un impact sur les tailles de populations sont rares, mais on peut s'attendre, *via* les effets sur les individus et les conséquences sur les relations interspécifiques, à des effets négatifs. Par exemple, une étude publiée en 2018 par Frank van Langevelde, de l'université de Wageningen, aux Pays-Bas, et ses collègues suggère que la

lumière artificielle nocturne est l'un des facteurs du déclin des populations de papillons nocturnes constaté sur la période 1985-2015 aux Pays-Bas: ce sont les espèces ayant un fort phototactisme positif dont les populations avaient le plus diminué.

Plus récemment, fin 2019, Brett Seymoure, de l'université d'État du Colorado, et des collègues ont rassemblé dans une publication de nombreux arguments, en s'appuyant sur les études disponibles, suggérant que la lumière artificielle nocturne, en perturbant les mouvements, le développement, l'alimentation ou la reproduction des insectes, est un facteur important, mais sous-estimé, du déclin rapide de leurs populations.

Outre ses impacts sur la biodiversité, la lumière artificielle nocturne peut avoir des effets négatifs sur les services rendus à l'homme par les écosystèmes. Avec des collègues, Eva Knop, à l'université de Berne, en Suisse, en a fourni une élégante démonstration en 2017. Ces chercheurs ont mené une expérimentation en champs, avec des parcelles éclairées et d'autres maintenues dans l'obscurité naturelle, qui a montré explicitement les effets combinés de lumière artificielle nocturne sur les réseaux de pollinisateurs nocturnes et diurnes. Dans les zones éclairées, les interactions nouvelles entre les pollinisateurs diurnes et nocturnes, qui normalement ne se rencontrent pas, ont réduit le nombre de fleurs visitées aussi bien la nuit que, de façon plus surprenante, le jour. Avec, pour conséquence, une production de graines fortement diminuée.

Des effets de la pollution lumineuse nocturne sur la santé humaine sont également vraisemblables. On le suspecte dans le cas de certains cancers. De plus, des effets indirects sur la santé humaine sont possibles *via* la transmission de maladies véhiculées par des insectes. Par exemple, une étude publiée en 2012 et portant sur trois villages mexicains a montré que l'infestation des habitations par les punaises *Triatoma dimidiata* (qui se nourrissent de sang de vertébrés, dont les humains), vectrices de la maladie de Chagas, est notablement plus importante à proximité des sites d'éclairage public.

L'éclairage artificiel nocturne a-t-il toujours des conséquences négatives? Peut-être pas, puisque certaines espèces en profitent. Nous avons vu que certaines espèces de chauves-souris tirent parti de la lumière artificielle nocturne et tendent à chasser près des lampadaires, vers lesquels les insectes sont attirés. De même, on peut citer les travaux publiés en 2018 par Roy van Grunsven et ses collègues, de l'institut d'écologie IGB, à Berlin, montrant que certaines limaces profitent de la lumière artificielle nocturne pour s'alimenter en réduisant



Le Tribute in Light, structure lumineuse mise en place à New York pour commémorer l'attentat du 11 septembre 2001 contre les tours jumelles, perturbe notablement les espèces d'oiseaux migrant la nuit. Une équipe de chercheurs a estimé à 1,1 million le nombre d'oiseaux qui ont été piégés par ce mémorial lumineux au cours des 49 jours, répartis sur plusieurs années, ayant fait l'objet d'un suivi.



le risque de prédation et en augmentant le succès de la recherche de nourriture.

L'optimisme n'est pourtant pas de mise si l'on met ces résultats en regard des nombreux indicateurs d'effets négatifs. Néanmoins, des études portant sur le long terme sont nécessaires pour dresser un bilan rigoureux et objectif. De tels travaux permettront de décrire et quantifier les modifications des interactions (trophiques, compétitives, etc.) au sein des communautés d'espèces, et ainsi de prédire l'impact sur le fonctionnement des écosystèmes et les trajectoires évolutives que vont emprunter les espèces, trajectoires dont certaines peuvent mener à l'extinction...

QUELS REMÈDES ?

Même si l'on ne connaît pas encore bien l'étendue des bouleversements dans les écosystèmes soumis à la pollution lumineuse, les altérations observées sont à présent si nombreuses qu'une concertation entre décideurs, législateurs, scientifiques et citoyens devient indispensable.

En France, l'Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturne (ANPCEN) milite depuis 1999 pour le respect de la nuit et de l'environnement nocturne. Elle a joué un rôle primordial pour faire évoluer la législation française relative à l'éclairage nocturne (Grenelle de l'Environnement, loi sur la transition énergétique, loi de reconquête de la biodiversité de la nature et des paysages). L'éclairage public faisant partie de la compétence de police du maire, c'est à lui

d'ajuster la durée, l'intensité et la qualité de la lumière artificielle nocturne et ce, même en cas de délégation de l'éclairage à un syndicat d'énergie (article L.2212-1 du code général des collectivités territoriales).

Les maires disposent de plusieurs leviers pour limiter la pollution lumineuse. Des centaines de communes programment leur éclairage public afin de l'éteindre une bonne partie de la nuit, période pendant laquelle les activités humaines et le besoin en lumière sont moindres. Ces communes peuvent bénéficier d'un label « villes et villages étoilés » indiquant une vraie réflexion locale sur les nuisances lumineuses.

Un éclairage mieux conçu contribue également à une limitation de la pollution lumineuse. Nous avons tous en mémoire les lampadaires « boules » qui dissipent l'essentiel de la lumière produite vers le ciel et non vers la chaussée. L'éclairage public a été repensé, avec des réflecteurs et des formes de lampadaire qui concentrent le flux lumineux sur la zone utile, mais des milliers de points lumineux restent encore à moderniser. Par ailleurs, l'essor des LED dans l'éclairage public a des effets pervers. D'une part, certaines communes profitent des économies d'énergie associées pour augmenter le nombre de points d'éclairage. D'autre part, on l'a vu, l'émission des LED utilisées a souvent une part importante de lumière bleue qui altère la sécrétion de mélatonine : des LED produisant une lumière plus chaude (orange-ambree) sont à privilégier.

Il est aussi possible de coordonner des actions à une échelle spatiale supérieure. Les premières mesures de réduction à une grande échelle de la pollution lumineuse ont été mises en œuvre afin de garantir le fonctionnement correct de certains observatoires astronomiques. C'est ainsi que la première réserve internationale de ciel étoilé (RICE) a été inaugurée en 2007 au Canada, près de l'observatoire du Mont-Mégantic. Cela s'est traduit par une réduction drastique des niveaux de la lumière artificielle nocturne dans les 25 communes autour de l'observatoire. En France, deux réserves ont été créées avec le même objectif (pic du Midi de Bigorre, en 2013, et parc national des Cévennes, en 2018). Enfin, ces dernières années, des travaux ont été menés autour du concept de « trame noire » afin d'identifier et maintenir un réseau écologique « refuge » caractérisé par son obscurité pour les animaux nocturnes.

Ainsi, il existe des solutions au problème de la pollution lumineuse, problème dont l'ampleur se révèle de plus en plus importante. Moyennant quelques efforts, il est possible de maintenir une nuit noire et réduire les effets néfastes de la lumière artificielle nocturne. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. Desouhant et al., **Mechanistic, ecological, and evolutionary consequences of artificial light at night for insects : Review and prospective**, *Entomologia Experimentalis et Applicata*, vol. 167, pp. 37-58, 2019.

F. Falchi et al., **Light pollution in USA and Europe : The good, the bad and the ugly**, *Journal of Environmental Management*, vol. 248, 109227, 2019.

A. C. S. Owens et al., **Light pollution is a driver of insect declines**, *Biological Conservation*, vol. 241, article 108259, 2019.

T. W. Davies et T. Smyth, **Why artificial light at night should be a focus for global change research in the 21st century**, *Global Change Biology*, vol. 24, pp. 872-882, 2018.

F. Falchi et al., **The new world atlas of artificial night sky brightness**, *Science Advances*, vol. 2, e1600377, 2016.

K. J. Gaston et al. (dir.), **The biological impacts of artificial light at night : From molecules to communities**, numéro thématique de *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 370, n° 1667, 2015.