



ENJEUX SCIENCES

# POLLUTIONS SENSORIELLES

LA FACE CACHÉE  
DE NOTRE EMPREINTE ÉCOLOGIQUE ?

ROMAIN SORDELLO

éditions  
Quæ



POLLUTIONS  
SENSORIELLES  
LA FACE CACHÉE DE NOTRE  
EMPREINTE ÉCOLOGIQUE?

ROMAIN SORDELLO

## Dans la même collection

*Tiques et santé. Biologie, maladies, maîtrise du risque*

Rispe C., Bournez L., Durand J., Duron O., René-Martellet M.,  
2026, 120 p.

*Marine biological invasions*

P. Gouilletquer, 2025, 120 p.

*Gluten, alimentation et santé*

M.-F. Samson, D. Desclaux, 2025, 120 p.

### Pour citer cet ouvrage

Sordello R., 2026. *Pollutions sensorielles. La face cachée de notre empreinte écologique ?* Versailles, éditions Quæ, 120 p.  
<https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4200-9>

Cet ouvrage est issu de la thèse de l'auteur : *Écologie du paysage et écologie sensorielle : prendre en compte les pollutions lumineuses, sonores et olfactives dans les trames écologiques. De la connaissance à l'action.*

Muséum national d'histoire naturelle, 2024.

Les éditions Quæ réalisent une évaluation scientifique des manuscrits avant publication dont la procédure est décrite ici :  
<https://www.quae.com/store/page/199/processus-d-evaluation>

Le processus éditorial s'appuie également sur un logiciel de détection des similitudes et des textes potentiellement générés par intelligence artificielle (IA).

Cet ouvrage a été publié avec le concours scientifique et financier de Patrinat (OFB-MNHN-CNRS-IRD).

Les versions numériques de cet ouvrage sont diffusées  
sous licence CC-by-NC-ND 4.0  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

© Éditions Quæ, 2026

ISBN (papier) : 978-2-7592-4199-6      ISBN (PDF) : 978-2-7592-4200-9  
ISBN (ePub) : 978-2-7592-4201-6      ISSN : 2267-3032

Éditions Quæ  
RD 10  
78026 Versailles Cedex  
[www.quae.com](http://www.quae.com) / [www.quae-open.com](http://www.quae-open.com)

# Sommaire

<b>Introduction</b> .....	<b>5</b>
L'érosion de la biodiversité .....	5
L'artificialisation des milieux .....	6
Les pollutions ne sont pas que matérielles .....	8
Pourquoi ce livre ? .....	9
<b>1. Comment les individus entrent-ils en relation ?</b> .....	<b>11</b>
Les systèmes sensoriels, de la réception du signal à son interprétation .	12
La lumière et la vision .....	17
Le son et l'ouïe .....	20
Les molécules volatiles et l'odorat.....	23
La perception sensorielle dans le fonctionnement écologique.....	25
<b>2. Qu'est-ce qu'un paysage sensoriel ?</b> .....	<b>30</b>
Du paysage physique au paysage sensoriel .....	30
Paysages visuels nocturnes, sonores et olfactifs : les oubliés du paysage ? .....	36
La perception sensorielle à l'échelle du paysage.....	44
<b>3. Quelle est notre empreinte écologique sensorielle ?</b> .....	<b>50</b>
La lumière artificielle nocturne .....	50
Les sons anthropiques .....	59
Les odeurs anthropiques .....	64
Les pollutions sensorielles : une préoccupation nouvelle, une responsabilité collective .....	68
<b>4. Comment limiter ou résorber les pollutions sensorielles ?</b> ...	<b>82</b>
Éviter puis réduire .....	82
Comment ces pollutions sont-elles gérées en France ? .....	88

<b>5. Les trames écologiques, une perspective pour les territoires ?</b> .....	<b>96</b>
Le concept de réseaux écologiques .....	97
Les trames écologiques : des outils de planification plébiscités à travers le monde .....	99
Les limites des trames écologiques actuelles.....	101
Trames noires, blanches et olfactives.....	103
Un chantier interdisciplinaire .....	105
<b>Conclusion</b> .....	<b>109</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>113</b>



# Introduction

Le terme de « biodiversité » désigne par contraction l'ensemble de la diversité biologique. Il a fait son apparition lors d'un colloque mondial, le Sommet de la Terre, tenu à Rio en 1992, qui a débouché sur un texte international de référence, la « Convention sur la diversité biologique ». Ce texte définit la diversité biologique comme la « variabilité des organismes vivants de toute origine, y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie ; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces ainsi que celle des écosystèmes ». Le mot « biodiversité » fait aujourd'hui partie du langage courant des écologues, et il a relativement bien infusé dans la société. Plus technique que la « nature », la biodiversité intègre l'humain parmi les espèces et englobe les diverses échelles d'organisation du vivant, depuis les gènes jusqu'aux écosystèmes, ainsi que leurs interactions (entre individus d'une même espèce ou d'espèces différentes).

## L'ÉROSION DE LA BIODIVERSITÉ

Nous vivons une situation alarmante sur le plan écologique. La biodiversité s'érode à un rythme effréné. Dès les années 2000, une évaluation commandée par l'Organisation des Nations unies (ONU), le Millennium Ecosystem Assessment, réalisée par des centaines d'experts internationaux, avait fait le constat d'une disparition des espèces 1 000 fois plus rapide que le taux de l'évolution naturelle. Les scientifiques documentent précisément cet effondrement grâce à des suivis. Des indicateurs sont disponibles depuis plusieurs décennies et pour des taxons variés. Certaines espèces ont bel et bien disparu de la planète, et la proportion d'espèces menacées d'extinction est très significative : 28 % au global, et jusqu'à 41 % pour certains groupes biologiques comme les amphibiens (UICN, 2020). Les aires de répartition de nombreuses espèces se réduisent et les effectifs des populations s'effondrent. D'après l'évaluation publiée par le Fonds mondial pour la nature,



les effectifs des vertébrés sauvages ont régressé de 69 % comparativement à 1970 (WWF, 2022). Une équipe de chercheurs a évalué en 2017 que, sur la période 1900-2015, 177 espèces de mammifères ont perdu au moins 30 % de leur aire de répartition, et plus de 40 % d'entre elles ont perdu au moins 80 % de leurs effectifs (Ceballos *et al.*, 2017). Cet effondrement touche aussi des espèces que l'on qualifie habituellement de « communes », ce qui est particulièrement préoccupant. Les oiseaux de nos campagnes françaises ont perdu 30 % d'individus entre 1989 et 2019, et les papillons de prairies ont chuté de 39 % en Europe depuis 1990 (Fontaine *et al.*, 2020).

Au cours des temps géologiques, la vie sur Terre a déjà subi plusieurs extinctions de masse. Le grand public a bien en tête la disparition des dinosaures, qui correspond à la crise « Crétacé-Paléocène » il y a 66 millions d'années. Mais ces différentes ruptures dans l'histoire de la vie ont été générées par des événements géologiques du système Terre (ex. : volcanisme) ou en provenance de l'univers (ex. : météorite). La crise que nous vivons actuellement est d'une autre nature. Elle est engendrée par notre propre manière d'être au monde. En d'autres termes, une seule espèce provoque la dégradation des conditions de vie de toutes les autres.

Les scientifiques reconnaissent en particulier cinq grands facteurs d'origine anthropique qui expliquent la perte de biodiversité : le changement d'usage des sols, la surexploitation des ressources, le changement climatique, les pollutions et les espèces au comportement invasif.

## L'ARTIFICIALISATION DES MILIEUX

Notre manière d'aménager les territoires est très consommatrice de milieux naturels. Nous construisons des villes, des routes, des barrages, nous coupons des forêts, nous prenons de la place pour les cultures et l'élevage et nous occupons l'espace géographique de biens d'autres manières encore. En France métropolitaine, d'après l'Observatoire national de la biodiversité (ONB, 2019), plus d'un demi-million d'hectares de terres agricoles et d'espaces

naturels ont été perdus entre 2006 et 2015. En 2015, près de 10% de notre territoire métropolitain étaient déjà couverts par des surfaces artificialisées, soit une augmentation depuis 2006 correspondant à la superficie d'un département comme la Seine-et-Marne<sup>1</sup>.

En 2012, un groupe intergouvernemental indépendant sur la biodiversité et les services écosystémiques a été créé, l'Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), l'équivalent pour la biodiversité du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), bien plus connu du grand public. Dans l'état des lieux publié par l'IPBES en 2019, le changement d'usage des sols depuis des milieux naturels vers des milieux artificialisés ressort comme la pression anthropique principale qui pèse sur les écosystèmes, pour un tiers environ s'agissant des écosystèmes terrestres.

Cette artificialisation conduit en effet à des modifications paysagères néfastes à la biodiversité, telles que la dégradation, la destruction et la fragmentation des habitats naturels.

La dégradation des habitats amène petit à petit une homogénéisation des écosystèmes à un niveau médiocre, favorisant les espèces peu exigeantes, voire invasives. En France, notons que seuls 6% des sites humides sont considérés en bon état de conservation (ONB, 2020). La disparition pure et simple des surfaces d'habitats diminue les ressources disponibles pour les espèces sauvages. Cela engendre mécaniquement une contraction des aires de répartition qui contribue à la réduction des effectifs. L'isolement des habitats relictuels est, quant à lui, préjudiciable pour la libre circulation des organismes dans le paysage. Cela pose des problèmes aussi bien à court terme (mortalité) qu'à long terme (baisse du brassage génétique).

Ces phénomènes d'artificialisation des sols sont étudiés depuis très longtemps par les scientifiques. On peut dire aussi qu'ils sont identifiés de longue date par l'écologie politique, même si

---

1. <http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr>

le niveau de prise en charge est variable et souvent insuffisant. En France, on connaît la politique publique de la « trame verte et bleue », née en 2007 pour lutter précisément contre la disparition et la fragmentation des habitats naturels. L'objectif est de préserver et de restaurer des continuités écologiques pour différents milieux : les milieux ouverts, forestiers, humides, aquatiques ou encore côtiers.

Ces politiques ont apporté énormément à la protection de la nature en dépassant une vision trop « fixiste » de la biodiversité. Elles prennent en compte son caractère dynamique à l'échelle du paysage. Elles cherchent à intégrer la biodiversité dans l'aménagement du territoire. Toutefois, ces politiques se sont essentiellement concentrées sur l'empreinte physique de nos activités : construction de routes ou de barrages, coupe de forêts, etc., ignorant ainsi la dimension sensorielle du monde vivant. Pourtant, nos activités émettent aussi des ondes ou des molécules volatiles dans l'environnement susceptibles de perturber les écosystèmes. Dans cet ouvrage, nous allons ainsi nous intéresser à la lumière artificielle nocturne, au bruit et aux molécules odorantes d'origine anthropique. Nous allons voir que ces perturbations, que l'on peut regrouper sous les termes de « pollutions sensorielles », contribuent aussi à l'artificialisation des milieux.

## LES POLLUTIONS NE SONT PAS QUE MATÉRIELLES

La responsabilité des pollutions dans l'érosion de la biodiversité (selon un indicateur global) est parfaitement reconnue, estimée à environ 10 % d'après l'IPBES (2019).

Parmi les différentes formes de pollutions, tout le monde se représente assez facilement les phénomènes comme la pollution des sols par des métaux lourds, de l'eau par des nitrates ou de l'air par des particules fines. Ces pollutions sont générées par des substances chimiques (ex. : pesticides, hydrocarbures, crèmes solaires, lessives) ou physiques (ex. : pollutions aux plastiques, déchets inertes). Ces processus sont étudiés là aussi depuis longtemps par les scientifiques, et des plans nationaux existent pour améliorer la qualité de l'eau ou de l'air, en particulier en

lien avec notre propre santé publique. Ce sont aussi ces pollutions que considère l'IPBES dans son évaluation.

Or, depuis quelques années, des pollutions interférant avec la perception sensorielle des espèces attirent l'attention des écologues. Dans cet ouvrage, nous allons évoquer le cas de la pollution lumineuse, de la pollution sonore et de la pollution olfactive. Ces pollutions de nature ondulatoire ou chimique bousculent notre manière de considérer les pollutions. Pourtant, nous nous appuyons sur l'*Encyclopædia Universalis*, qui définit une pollution comme toutes les « actions qui dégradent d'une façon ou d'une autre le milieu naturel », une définition large à laquelle nous verrons que les émissions anthropiques de lumière, de sons ou d'odeurs répondent tout à fait.

Chacun a peut-être déjà eu le sommeil perturbé par la lumière d'un lampadaire pénétrant dans une chambre sans volet, a déjà été fatigué par les bruits omniprésents de la ville, ou a déjà été importuné par les odeurs nauséabondes d'une décharge. Généralement qualifiées de « nuisances », ces perturbations affectent notre bien-être, voire notre santé. Nous allons montrer qu'elles ont aussi des effets négatifs sur la faune et les écosystèmes. La littérature scientifique en écologie décrit même des dommages très étendus et divers, qui vont bien au-delà des simples nuisances. Pourtant, elles occupent beaucoup moins de place dans le débat sociétal et politique.

## POURQUOI CE LIVRE ?

Cet ouvrage se propose de mettre en avant un problème peu connu et peu pris en compte, celui des pollutions sensorielles, en prenant le cas des pollutions lumineuses, sonores et olfactives, qui sont pour le moment les plus étudiées par la science. Ce problème a récemment été soulevé dans le cadre d'une thèse de doctorat à laquelle cet ouvrage fait écho (Sordello, 2024). L'objectif est ici de dépasser la sphère strictement académique pour éveiller le plus grand nombre — citoyens éclairés, étudiants et enseignants, gestionnaires et parties prenantes de la préservation de la biodiversité — à cet enjeu écologique nouvellement identifié.

Ce livre offre une base synthétique de connaissances scientifiques pour comprendre les mécanismes clés des impacts de ces pollutions lumineuses, sonores et olfactives sur la biodiversité (en se limitant à la faune, et avant tout dans les écosystèmes terrestres, même si quelques exemples sur les écosystèmes aquatiques seront donnés). Ce faisant, il invite le lecteur à reconsidérer la complexité de nos impacts écologiques, soulignant qu'ils ne sont pas seulement d'ordre physique et que nos activités ont également une empreinte écologique sensorielle. Il aborde également les solutions pour résorber ou limiter ces pollutions. En croisant les regards de l'écologie sensorielle et de l'écologie du paysage, il s'attarde en particulier sur l'échelle du paysage. Enfin, il s'achève sur la perspective de prendre en compte ces pollutions à l'échelle des territoires dans les trames écologiques.

Au-delà des pollutions sensorielles et de leurs impacts, cet ouvrage vise à repositionner l'importance de la perception sensorielle en écologie, comme un levier indispensable pour mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes et des paysages. Il plaide ainsi pour une approche moins anthropocentrée en tentant de se mettre davantage « à la place » des non-humains.

Avant d'aborder les pollutions sensorielles, certaines connaissances restent indispensables pour bien comprendre les mécanismes sous-jacents de la perception visuelle, acoustique et olfactive.



# 1. COMMENT LES INDIVIDUS ENTRENT-ILS EN RELATION ?

Les organismes vivants interagissent entre eux et avec leur environnement par le biais de la perception sensorielle. Ils mobilisent leurs sens pour décrypter les informations présentes autour d'eux, et ici nous allons évoquer trois sens : la vue, l'ouïe et l'odorat.

Ces informations permettent aux individus de réduire leur niveau d'incertitude et de disposer d'une meilleure connaissance (voire d'une meilleure « conscience » ?) de ce qui les entoure, augmentant ainsi la probabilité de réagir de manière adaptée, par réflexe ou par prise de décision. Dit autrement, c'est par le biais de la perception sensorielle que les individus accomplissent leur cycle biologique, par exemple trouver des ressources favorables pour se nourrir (et donc vivre et se reproduire) ou au contraire éviter un danger (et donc potentiellement échapper à la mort).

Les signaux lumineux, sonores ou olfactifs dans l'environnement peuvent être émis par des éléments du milieu naturel (sources dites « abiotiques »), par exemple le bruit du tonnerre, la lumière des étoiles ou l'odeur de la pluie. Ils peuvent aussi provenir d'autres organismes (sources dites « biotiques »). En effet, les êtres vivants eux-mêmes envoient des signaux (bioluminescence, vocalisations, phéromones, etc.) afin de faire passer des messages aux autres vivants et de provoquer chez eux des réactions : attirer un partenaire potentiel, s'identifier auprès d'un parent, avertir des conspécifiques de l'arrivée d'un danger, intimider un prédateur.

Les signaux peuvent être des ondes pour la lumière et le son ou des molécules pour les odeurs, et ils sont véhiculés dans l'eau ou l'air (voire le sol). Ces signaux sensoriels sont alors captés par les organismes au moyen de systèmes sensoriels.

Ce chapitre n'a pas vocation à se substituer à un cours d'éco-physiologie ou de neurologie, il a pour but de fournir au lecteur des connaissances de base sur le processus de la perception



sensorielle et son rôle pour les populations animales, afin de l'aider à mieux comprendre ensuite les impacts des émissions sensorielles anthropiques. Pour aller plus loin, le lecteur peut consulter des ouvrages en écophysiologie et en écologie comportementale (Sherwood *et al.*, 2016 ; Danchin *et al.*, 2021).

## LES SYSTÈMES SENSORIELS, DE LA RÉCEPTION DU SIGNAL À SON INTERPRÉTATION

Qu'est-ce qu'un système sensoriel ?

La perception sensorielle va de la réception du signal (stimulus) jusqu'à son intégration par l'organisme. Son processus met donc en jeu à la fois la capacité d'un individu à recevoir les signaux extérieurs — par exemple les capteurs sensoriels dont il dispose — et ses facultés d'intégration, voire de cognition. Selon les organismes et les situations, le signal sensoriel — une fois transformé en information pour l'individu — engendra ou non une action et, le cas échéant, des comportements réflexes ou plus « élaborés » faisant intervenir des capacités cognitives (interprétation, mémoire, déduction, analyse, mise en contexte, etc.).

On appelle « système sensoriel » l'ensemble du circuit sensitif au sein d'un individu (ici animal) qui va de cette réception du stimulus jusqu'à son intégration. Il comprend donc à la fois les récepteurs sensoriels, les voies de transmission et les parties du système nerveux central responsables du traitement de l'information.

Malgré la pluralité des sens et des organismes, on peut identifier un schéma commun aux systèmes sensoriels (figure 1) :

- un stimulus (lumière, son, molécule odorante) est capté par un récepteur sensoriel (ex. : photorécepteur, cellule ciliée de l'oreille) ;
- ce stimulus est converti en signal nerveux. Cette étape correspond donc à une transformation d'énergie appelée « transduction » ;
- le signal nerveux se propage dans le système nerveux sous forme de potentiels d'action (impulsions électriques très brèves qui se propagent le long des neurones) ;

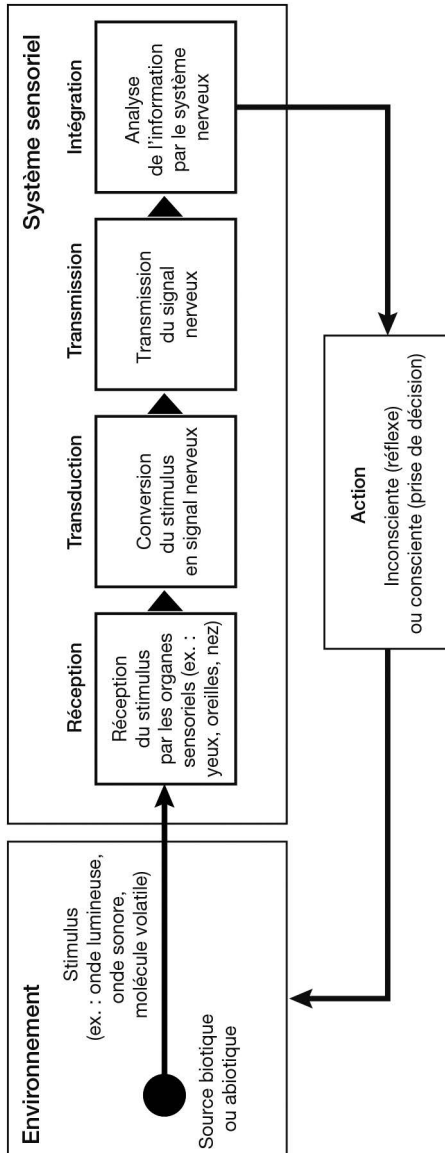


Figure 1. Schéma type d'un circuit sensoriel (source : d'après Sordello, 2024).



– le système nerveux intègre et synthétise les informations reçues provenant des différents systèmes sensoriels, ce qui aboutit à une éventuelle réponse (physiologique, comportementale) réflexe ou consciente.

On distingue plusieurs types de récepteurs sensoriels selon la nature du stimulus qu'ils sont capables de recevoir. Sans chercher à être exhaustif, nous mentionnons ici les récepteurs liés aux sens sur lesquels cet ouvrage se focalise :

- les photorécepteurs, qui réagissent à la lumière ;
- les mécanorécepteurs, qui détectent des déformations des tissus, des vibrations ou des variations de pression et sont donc impliqués dans l'ouïe ;
- les chimiorécepteurs, qui sont stimulés par certaines molécules et sont donc impliqués dans l'olfaction.

Chez les organismes complexes, les récepteurs sensoriels sont situés dans ou sur des organes sensoriels (ex. : œil, oreille, cavité nasale).

Au cours du circuit sensitif, l'activité nerveuse dépend d'un seuil de détection (seuil neuronal). C'est en fonction de ce seuil que le stimulus reçu devient une information ou reste un stimulus neutre (non informatif). Par exemple, pour qu'une odeur soit perçue, les molécules doivent être présentes en quantité suffisante.

Ce seuil de détection est variable, y compris chez un même individu en fonction de son état physiologique, de son niveau d'« attention » ou du contexte.

Un seul signal peut suffire à atteindre ce seuil, mais dans les faits il est souvent atteint par l'accumulation de plusieurs signaux faibles. Ce phénomène est appelé « sommation », et on distingue :

- la sommation temporelle, lorsque plusieurs stimulus sont reçus de manière successive ;
- la sommation spatiale, lorsque les signaux reçus par plusieurs récepteurs convergent vers le même neurone.

Enfin, rappelons que le déclenchement d'un potentiel d'action par un neurone fonctionne selon le principe du « tout ou rien ». Si le seuil de déclenchement n'est pas atteint, aucun potentiel

d'action n'est produit, et s'il est atteint, un potentiel d'action est généré. L'intensité d'un stimulus n'est donc pas codée par l'amplitude du signal nerveux (qui est toujours la même), mais par la fréquence des potentiels d'action et par le nombre de neurones activés.

### Brève histoire des systèmes sensoriels

Aujourd'hui, la science a décrit plusieurs systèmes sensoriels spécialisés, plus ou moins présents et développés selon les organismes, par exemple les systèmes visuels, auditifs et olfactifs — respectivement vecteurs des sens de la vision, de l'ouïe et de l'odorat (voir exemple en tableau 1 chez un mammifère).

Il reste difficile de retracer l'histoire de ces systèmes sensoriels. La communication étant intrinsèque à la vie, il est intuitif de penser que, très tôt dans l'évolution, les êtres vivants ont été équipés de capteurs leur permettant d'interagir entre eux et avec leur environnement. En effet, les organismes unicellulaires (bactéries) ont eux aussi la possibilité d'acquérir de l'information provenant de l'extérieur par le biais de récepteurs membranaires simples, de types chimiorécepteurs, mécanorécepteurs et photorécepteurs.

Toutefois, une période charnière dans l'évolution a pu être identifiée comme un moment clé dans la complexification des organismes. Grâce aux données géologiques et paléontologiques, nous savons que c'est au Cambrien, il y a environ 500 millions d'années, que, de manière « brutale » et rapide, les organismes pluricellulaires et macroscopiques sont apparus. Les scientifiques estiment que ce sont des conditions stables et favorables sur Terre (ou plutôt dans l'eau) qui ont permis tout à coup à la vie de se déployer. Par le biais d'adaptations et de contre-adaptations, notamment entre les proies et les prédateurs, une « course à l'armement » (c'est l'expression employée) se serait alors déclenchée. Cette coévolution aurait engendré parallèlement une complexification des systèmes sensoriels et un enrichissement des signaux sensoriels : on parle d'« explosion cambrienne », et même d'une « révolution de l'information ».

**Tableau 1. Présentation simplifiée des principales étapes du circuit sensitif pour la vision, l'ouïe et l'odorat chez un mammifère.**

Sens	Stimulus	Organe sensoriel	Récepteur	Signal	Conducteur	Intégrateur*
Vision	Lumière	Œil	Rétine	Influx nerveux	Nerf optique	Aire visuelle du cerveau
Ouïe	Son	Oreille	Cochlée		Nerf auditif	Aire auditive du cerveau
Odorat	Odeur	Nez	Épithélium olfactif		Nerf olfactif	Aire olfactive du cerveau

\* Il existe en réalité plusieurs aires sensorielles pour un sens donné (primaires, secondaires, etc.).

## LA LUMIÈRE ET LA VISION

### La lumière, une onde électromagnétique

La lumière est une onde électromagnétique. En tant qu'oscillation, elle peut se caractériser par sa longueur d'onde — définie comme le trajet parcouru par l'onde pendant une période (ou, dit autrement, la distance horizontale entre deux creux ou crêtes consécutifs de l'onde) — et par sa fréquence (nombre d'oscillations par seconde). Dans le même temps, la lumière véhicule des particules élémentaires, les « grains de lumière », appelés « photons » (on parle de dualité onde-corpuscule).

Généralement, ce que l'on appelle « lumière » dans le langage courant correspond à la partie du spectre électromagnétique visible par les humains, qui va de 400 nm (violet) à 800 nm (rouge). Au-delà se trouvent les infrarouges et en deçà les ultraviolets. Cela permet d'ores et déjà de souligner que la notion même de sens, avec des sens bien distincts (vue, ouïe, odorat, etc.), est anthropocentrée, et qu'il peut exister une porosité dans la réalité, par exemple concernant la captation des infrarouges entre vision et thermoréception.

### Comment la vision fonctionne-t-elle chez les vertébrés ?

La vision permet à l'individu d'obtenir une représentation « graphique » de ce qui l'entoure. La lumière perçue est transformée en une image, et c'est bien cette image qui nous amène à parler de système visuel. En effet, certains organismes sont dotés d'organes photosensibles, mais que l'on ne considère pas comme des systèmes visuels, car ils n'aboutissent pas à la formation d'images ; ils permettent par exemple de mesurer le niveau de luminosité ambiante ou de percevoir l'alternance jour-nuit. Notamment, les plantes sont munies de nombreuses molécules photosensibles qui servent à la photosynthèse (chlorophylles) et à la régulation de leur activité (cryptochromes, phototropines, phytochromes) ; de là à dire que les plantes ont des yeux...

Les capacités visuelles des organismes sont très variées. Selon les espèces, le champ visuel sera plus ou moins large, plus ou moins profond, plus ou moins riche en couleurs, l'image sera actualisée plus ou moins rapidement (détection des mouvements).



Les organes sensoriels du système visuel sont les yeux. Dans ces organes, la lumière est guidée vers des cellules réceptrices spécialisées (photorécepteurs) qui vont convertir cette énergie photonique en énergie électrique (influx nerveux). Il existe une très grande diversité d'yeux, mais on en distingue deux grands types : les yeux simples (présents chez les vertébrés ou les araignées) et les yeux composés (présents chez les insectes).

L'œil des vertébrés a la forme d'une cavité sphérique composée de différentes tuniques, d'un cristallin et de liquides (figure 2). La tunique la plus profonde est la rétine, dont la couche interne renferme les photorécepteurs ainsi que les cellules traitant et acheminant l'information visuelle vers le cerveau. Les fibres nerveuses sortent de l'œil par le nerf optique.

Les photorécepteurs impliqués dans la formation d'images visuelles comprennent les bâtonnets et les cônes. Les bâtonnets réagissent à des quantités de lumière faibles et rendent donc possible la vision nocturne, appelée « vision scotopique ». Les cônes nécessitent beaucoup plus de lumière pour fonctionner et ils sont ainsi impliqués dans la vision diurne, appelée « vision photopique ».

Chez certaines espèces, notamment chez l'humain, il n'existe qu'un seul type de bâtonnets, ce qui conduit à une vision scotopique en nuances de gris. D'autres taxons ont plusieurs types de bâtonnets, avec des pics d'absorption différents leur permettant de voir aussi des couleurs la nuit.

---

#### Note de la figure 2

A) Système visuel d'un mammifère (chevreuil européen, *Capreolus capreolus*). Œil brillant révélant le tapis réfléchissant situé au fond de l'œil, en réaction au flash de l'appareil photo, et coupe d'œil montrant l'intérêt de cette adaptation chez les espèces nocturnes (© Vincent Vignon ; © Arizona Board of Regents / ASU Ask A Biologist, <https://askabiologist.asu.edu/batonnets-et-cones>).

B) Système auditif d'une araignée (pholque phalangiste, *Pholcus phalangoides*). Individu entier et grossissement du métatarse d'une patte montrant une soie sensorielle (trichobothrie) insérée perpendiculairement et impliquée dans la réception des ondes sonores (© Romain Sordello ; © Maxime Esnault).

C) Papillon diurne avec ses antennes bien visibles, porteuses des sensilles olfactives impliquées dans la réception des odeurs (© Aurélien Daloz).

1. COMMENT LES INDIVIDUS ENTRENT-ILS EN RELATION?

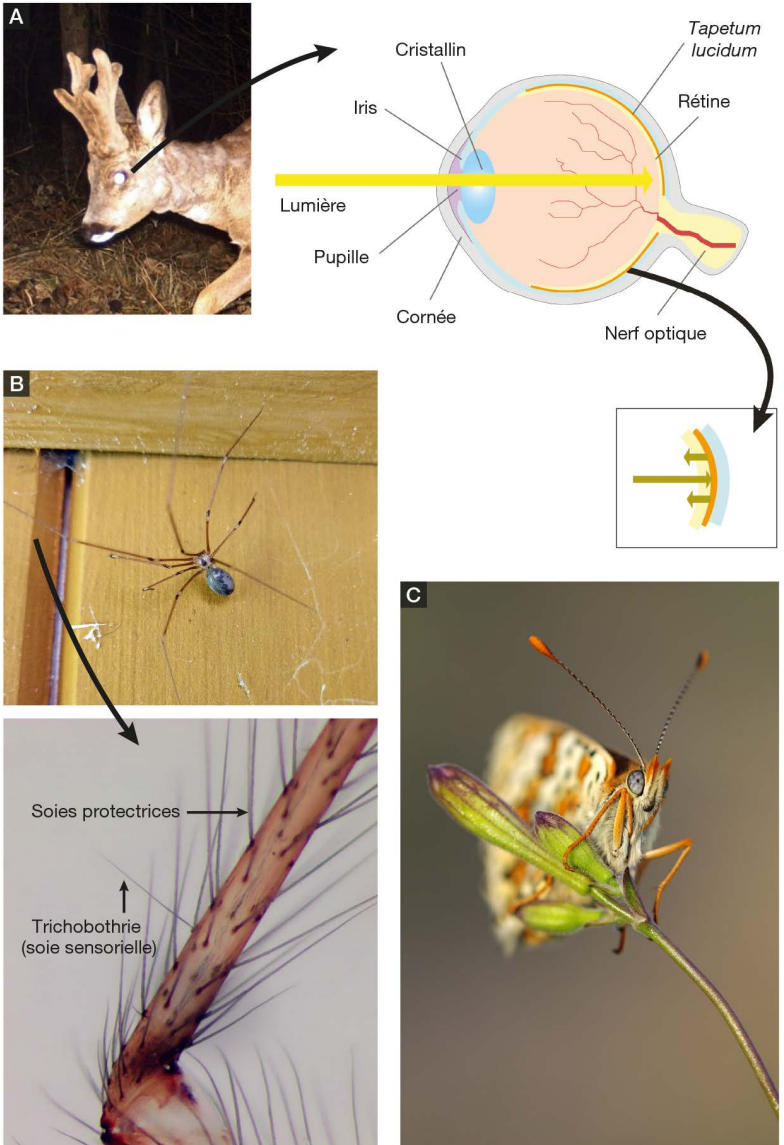


Figure 2. Éléments d'illustration d'un système visuel, auditif et olfactif.



Concernant les cônes, il en existe de nombreux types ayant chacun leur gamme de sensibilité. Par exemple chez l'humain, on en retrouve trois, appelés S, M et L (pour *short*, *medium* et *long*), dont le pic d'absorption est respectivement dans le bleu (S), le vert (M) et le rouge orangé (L).

Bien que les yeux des vertébrés soient tous construits selon le même schéma, les performances visuelles, notamment spectrales, sont très variables selon les espèces du fait de variations morphologiques et cellulaires. Cette diversité est en lien avec les niches écologiques et temporelles occupées par les espèces : mœurs nocturnes ou diurnes, habitat de prédilection fermé ou ouvert, capacités de mobilité, position dans la chaîne alimentaire, etc.

Notamment, les vertébrés nocturnes se caractérisent généralement par des yeux plus gros, une capacité à dilater davantage la pupille, des bâtonnets plus nombreux, une perception des infrarouges ou des ultraviolets, ou encore la présence d'une membrane réfléchissante derrière la rétine, le *tapetum lucidum*, qui amplifie la lumière perçue (figure 2). Chez les rapaces nocturnes, les yeux sont aussi situés au fond de parabolles formant un masque facial, ce qui constitue un avantage pour canaliser les ondes lumineuses (et sonores).

## LE SON ET L'OUÏE

### Le son, une onde mécanique

Comme la lumière, le son est une onde, mais qui se range parmi les ondes mécaniques et non pas électromagnétiques. En effet, l'onde sonore est une perturbation de proche en proche sans transport de matière. Elle est générée par une source qui exerce une « pression acoustique » sur le milieu — le sol, l'eau ou l'air —, et cette pression se propage ensuite à travers ce milieu, elle ne se propage pas dans le vide.

L'onde sonore se caractérise, comme la lumière, par sa longueur d'onde (période spatiale) et sa fréquence (nombre d'oscillations par seconde). Les sons aigus correspondent aux fréquences élevées et, inversement, les sons graves sont de basses fréquences.

Les sons audibles par les humains vont de 20 Hz à 20 kHz environ. Sur la base de cette fourchette anthropocentrée, on qualifie d'infrasons les sons inférieurs à 20 Hz et d'ultrasons les sons supérieurs à 20 kHz.

L'onde sonore peut aussi se caractériser par sa vitesse (célérité), qui dépend uniquement du milieu de propagation. Dans l'air, le son se déplace à 340 m/s. Enfin, l'écart entre les crêtes et les creux de l'onde sonore correspond à ce que l'on appelle son « amplitude », exprimée en décibel (dB). C'est ce que l'on appelle plus communément le « volume sonore » (est-ce que le son est fort ou faible). Plus l'amplitude d'une onde sonore est élevée, plus le son sera perçu comme fort et, au-dessous d'un certain seuil, le son ne sera plus perçu.

### Les systèmes auditifs

Les facultés de perception acoustique sont très variables selon les espèces, qu'il s'agisse notamment des fréquences ou de l'amplitude. Certains taxons peuvent percevoir les infrasons et/ou les ultrasons. Cela reflète la pluralité des systèmes auditifs que l'on retrouve dans le vivant, qui ont fortement évolué en particulier au moment de la sortie des eaux. Là encore, les caractéristiques des systèmes auditifs sont à mettre en relation avec le milieu de vie occupé, les mœurs nocturnes ou diurnes ou la place dans la chaîne alimentaire. Par exemple, les rapaces nocturnes sont dotés d'une ouïe performante qui permet de compenser une vision limitée la nuit (malgré la spécificité de leur système visuel). L'entrée de leurs conduits auditifs se trouve près des yeux, au sein des disques faciaux, et ces conduits sont asymétriques, ce qui permet la localisation des sources sonores avec une grande précision.

Le système auditif des vertébrés nous est le plus familier : il est constitué d'un tympan qui communique les vibrations de l'air à l'oreille interne — là où les informations acoustiques seront traduites en impulsions nerveuses ; certains vertébrés sont aussi équipés d'une oreille externe (comme chez nous, les mammifères, avec nos oreilles). Mais chez certaines espèces, la perception des sons se fait par des moyens totalement différents. Nous prendrons l'exemple atypique des araignées.



## Comment les araignées perçoivent-elles les sons ?

Les araignées possèdent plusieurs sens. Elles ont 6 à 8 yeux simples, munis d'un *tapetum ludicum*, qui détectent les mouvements et/ou les images avec des degrés de résolution variables. Elles sont aussi capables de détecter les stimulus vibratoires, incluant les vibrations véhiculées par les supports (ex. : le sol ou la toile), mais aussi les vibrations véhiculées par l'air, c'est-à-dire des sons.

Dès 1966, des auteurs ont mis en évidence que les réactions comportementales de plusieurs espèces (*Araneus cavaticus*, *Argiope aurantia* et *A. avara*) à l'agitation de la toile (vibrations du support) et aux sons (vibrations aériennes) sont bien différentes (Frings et Frings, 1966). Une expérience plus récente fondée sur les réponses neuronales de l'espèce *Phidippus audax* a montré en 2016 que cette même espèce est capable de détecter des signaux sonores de 80 Hz à 3 m de la source (Shamble *et al.*, 2016).

Les araignées seraient donc bel et bien capables d'entendre. Pourtant, elles n'ont aucun tympan. Alors, sur quoi cette perception acoustique repose-t-elle ? Aujourd'hui encore, le système auditif des araignées reste mal décrit.

Il a été suggéré dans les années 1990 que ces récepteurs acoustiques soient localisés au niveau des pattes. En effet, les araignées possèdent des soies (sortes de poils) recouvrant leur corps. Certaines soies particulières, appelées « trichobothries », sont situées sur les pattes (figure 2). Ces soies sont connues pour être impliquées dans la perception du goût, de l'olfaction et du toucher. Elles sont munies de récepteurs et jouent un rôle déterminant dans la récupération d'information extérieure, peut-être même plus que la vue pour certaines tâches comme la capture de proies. Par exemple, une expérience menée en 1995 sur l'araignée *Cupiennius salei* a montré que des individus auxquels les trichobothries ont été retirées mais avec leurs yeux opérationnels ne sautent jamais en l'air pour attraper une proie volante, alors qu'ils le font lorsque leurs yeux sont masqués et leurs trichobothries préservées (Barth *et al.*, 1995). Une araignée peut posséder plusieurs centaines de ces soies minuscules, qui

mesurent quelques centaines de micromètres. Distribuées sur les tarsi, les tibias et les métatarses des pattes, elles forment ainsi une enceinte de capteurs à la périphérie de l'animal, permettant la réception d'informations provenant de toutes les directions.

L'implication des trichobothries dans la perception acoustique est donc pressentie : avec une architecture en « peigne », ces soies capteraient les vibrations de l'air, mais nous touchons ici aux limites de la connaissance.

Cet exemple sur la perception acoustique des araignées qui serait basée sur des soies sensorielles — faisant plus instinctivement penser au toucher qu'à l'ouïe — permet de souligner là encore la porosité qui existe entre les différents sens (en l'occurrence l'ouïe et le toucher). Le cloisonnement en systèmes sensoriels différents reste une lecture anthropocentrée ; dans la réalité, cette limite est parfois floue. Les organismes sont dotés de capteurs multiples leur conférant une perception globale de leur environnement.

## LES MOLÉCULES VOLATILES ET L'ODORAT

### Les odeurs, un message moléculaire

Avec les odeurs, nous changeons totalement de messenger sensoriel. Il ne s'agit plus là d'une communication ondulatoire mais d'une communication chimique. Une odeur résulte en effet de la propagation de molécules dans l'air ou dans l'eau entrant en contact avec un système olfactif. Ici, nous nous intéresserons à l'« olfaction aérienne », donc aux molécules volatiles.

Les odeurs ont des fonctions multiples pour les organismes. Elles peuvent :

- renseigner sur un danger (ressource avariée, incendie, etc.) ou être elles-mêmes des composés toxiques, amenant donc l'organisme à se protéger ou à fuir ;
- être un médiateur de la communication intraspécifique (ex. : les phéromones participent à la structuration des liens sociaux ou sexuels dans une population animale) ;
- être impliquées dans les relations interspécifiques (ex. : la détection entre proies et prédateurs).

Une odeur n'existe pas par elle-même : des molécules ne deviennent odorantes que si elles rencontrent des récepteurs biologiques qui les reconnaîtront comme telles. Selon l'espèce considérée, les molécules détectées par les récepteurs olfactifs entraîneront un message envoyé au système nerveux central qui sera assimilé à telle ou telle odeur, ou alors elles resteront olfactivement neutres.

Il en résulte qu'il est très compliqué de construire une typologie des odeurs. Certaines caractéristiques chimiques semblent influencer le caractère olfactif des molécules, comme la présence d'un groupe moléculaire spécifique (alcool, acide, aldéhyde, cétone, composé aromatique, etc.), la longueur de la chaîne (nombre d'atomes de carbone) et sa configuration spatiale. Mais des molécules très proches peuvent représenter des odeurs totalement différentes.

Malgré cette grande diversité chimique des composés générateurs d'odeurs, on les regroupe sous le terme de « composés organiques volatils » (COV) pour leur capacité à passer facilement de l'état liquide à l'état gazeux, dans les conditions normales de pression et de température. Leur volatilité est néanmoins variable (ex. : certaines phéromones sont des hydrocarbures à chaîne assez longue, peu volatils). Il existe aussi des composés volatils non organiques et à forte odeur (ex. :  $H_2S$ ).

Nous allons maintenant décrire un système olfactif en prenant l'exemple d'un insecte lépidoptère diurne.

### Comment les papillons diurnes perçoivent-ils les odeurs ?

Les papillons possèdent des antennes elles-mêmes recouvertes de soies appelées « sensilles olfactives » (figure 2). L'intérieur de ces soies est composé de récepteurs olfactifs, les neurones sensoriels, et c'est donc par ce biais que se fera la réception des molécules odorantes. Les molécules volatiles pénètrent dans ces soies à travers des pores. Elles se retrouvent alors dans un liquide, l'hémolymphe, qui sert d'interface entre le milieu extérieur et les récepteurs olfactifs. Comme les composés odorants volatils sont en général peu hydrosolubles, des protéines de transport vont faciliter leur transit dans cette « lymphe sensillaire » jusqu'à atteindre les récepteurs olfactifs.

Chaque récepteur olfactif reconnaît spécifiquement une molécule ou une famille de molécules. Par exemple, certains sont sensibles aux phéromones et d'autres aux odeurs issues des plantes. Il existe donc une grande variété de récepteurs olfactifs chez les papillons qui reflète la diversité des molécules odorantes existantes.

Les neurones olfactifs sont reliés au système nerveux central de l'animal où l'information est ensuite intégrée. Une odeur étant souvent un mélange de différentes molécules selon des proportions précises, sa reconnaissance par le système nerveux central est le résultat d'une analyse complexe (différentes molécules perçues, dosage du signal, etc.).

## LA PERCEPTION SENSORIELLE DANS LE FONCTIONNEMENT ÉCOLOGIQUE

### Des premiers éthologues à l'écologie sensorielle

Les éthologues (spécialistes du comportement animal) ont très tôt essayé de comprendre quels signaux de l'environnement influençaient les réactions des individus. Ils ont donc rapidement monté des expériences en manipulant notamment des odeurs. On pense en particulier à l'entomologiste et précurseur de l'éthologie Jean-Henri Fabre (1823-1915), qui a réalisé énormément d'observations au XIX<sup>e</sup> siècle sur les insectes et les mécanismes de l'olfaction.

En revanche, il faudra attendre les années 1990 pour que la prise en compte de la perception sensorielle au sein de l'écologie soit formalisée. En 1992, le biologiste David Dusenbery publie un ouvrage qui sonne aujourd'hui comme le point de référence : *Sensory Ecology: How Organisms Acquire and Respond to Information*<sup>2</sup>. Avant lui, on peut aussi évoquer l'émergence dans les années 1960 d'une « écologie chimique ». Cette branche de l'écologie cherche à décrire les interactions moléculaires entre les êtres vivants et avec leur environnement.

---

2. *Écologie sensorielle : comment les organismes acquièrent des informations et y réagissent* (traduit par l'auteur).

Cette discipline s'intéresse donc à la communication spécifiquement olfactive en tant que communication chimique.

L'écologie est la science qui cherche à comprendre les relations entre les êtres vivants et leurs milieux. L'écologie sensorielle s'inscrit ainsi dans cette filiation. Elle étudie comment les organismes interagissent entre eux et avec leur environnement par le biais des sens, et comment ces informations perçues influencent les communautés et les écosystèmes.

### De l'utilité des sens

Comme nous l'avons décrit précédemment, la vue conduit à la formation d'une image transmise au système nerveux central de l'animal, et ce dernier obtient donc une projection de son environnement. Cette image lui permet de comprendre ce qui l'entoure, de repérer sa nourriture, de reconnaître un conspécifique, un parent, un enfant, de détecter l'arrivée d'un danger, d'estimer des distances, des formes et des volumes.

Par le biais de l'ouïe, l'animal détecte les signaux sonores émis par son environnement biotique ou abiotique, qui peuvent traduire la présence d'un partenaire, d'un rival, d'un prédateur, d'une proie, ou renseigner sur la situation extérieure (ex. : présence d'un cours d'eau, vent, pluie). Il est aussi capable d'évaluer une distance et une direction vers laquelle se trouve un obstacle ou un être vivant, pour le poursuivre ou l'éviter. Certaines espèces — comme les cétacés ou les chauves-souris — disposent par ailleurs d'un sonar avec lequel elles écholocalisent, c'est-à-dire qu'elles analysent l'écho de leurs propres sons, généralement en utilisant des ultrasons.

Enfin, l'odorat repose, quant à lui, sur un fonctionnement chimique permettant d'identifier des ressources favorables (nourritures, soins) ou au contraire dangereuses (aliments avariés ou toxiques), de détecter un danger ou un concurrent, de pister une proie, ou de trouver et de reconnaître un congénère disponible. Grâce au caractère volatil du vecteur olfactif, l'odorat est très efficace à distance, de jour comme de nuit.

De nombreux processus déterminants dans le fonctionnement d'un écosystème font intervenir la perception sensorielle.

Voici quelques usages principaux de la perception sensorielle dans les populations animales.

### Rechercher sa nourriture, c'est assurer sa santé et sa survie

La perception sensorielle permet aux animaux de rechercher leur nourriture, de prélever des ressources alimentaires, de capturer une proie. Un bon usage des sens a donc un effet direct sur la condition physique et la survie des organismes, et, ce faisant, sur la pérennité des populations.

De nombreux organismes s'appuient sur des indices visuels, par exemple pour repérer leur nourriture : taille, forme, couleur, aspect sont autant d'indices pour en évaluer la qualité. La coévolution dans ce domaine — notamment entre plantes et insectes — est très largement documentée, par exemple autour de la pollinisation, de la dispersion des graines ou du développement des fruits. Ce bel exemple est connu du plus grand nombre : le pétale médian (labelle) des orchidées imite la forme et la couleur d'un insecte volant, ce qui a pour effet d'inciter les pollinisateurs à visiter la fleur. Des signaux visuels attirent aussi les insectes dans les toiles des araignées (ex. : dispositions des bandes de soies, ornements particuliers, reflets des rayons ultraviolets). Par exemple, ce pourrait être l'un des rôles de la structure verticale soyeuse en zigzag (le *stabilimentum*) sur la toile de l'argiope frelon (*Argiope bruennichi*).

Les stimulus sonores sont également utilisés par de nombreuses espèces pour repérer leurs proies. Entre autres, le bruit des insectes qui marchent renseigne les oiseaux insectivores ; de même, des vers de terre dans le sol peuvent être repérés par des indices acoustiques.

L'odorat est fortement mobilisé chez les mammifères, carnivores comme herbivores, pour trouver leurs ressources alimentaires. Les insectes nectarivores tels que les abeilles l'utilisent aussi pour repérer les fleurs, et les chauves-souris frugivores localisent leur alimentation à l'odeur. Les oiseaux sont dotés d'odorat, et celui des oiseaux marins et des rapaces est particulièrement développé. Des coléoptères détectent les odeurs de limaces dont ils se nourrissent. Une olfaction sélective permet aux éléphants de discerner la nourriture qui leur convient.



## Déjouer les dangers, et surtout éviter de se faire manger

Rester en vie, c'est également échapper aux dangers, et en particulier esquiver ses prédateurs. Les sens sont directement impliqués dans ce processus en permettant l'anticipation (détection à distance des prédateurs). L'interprétation des signaux sensoriels engendre ensuite une réaction antiprédateur adaptée (ex. : esquive, camouflage, fuite, attaque). Les mammifères notamment réagissent aux odeurs de leurs prédateurs par la fuite, l'évitement ou une vigilance accrue. Des expériences ont montré que les geckos fuient en réaction des odeurs de serpent et que des odeurs de poisson font fuir les larves de salamandre. Des études ont montré que l'apprentissage olfactif en réaction aux prédateurs est très rapide : des mammifères confrontés à de nouveaux prédateurs (espèces introduites) retiennent très vite l'odeur associée. L'information du danger se communique également entre conspécifiques par voie sensorielle, par exemple par des cris d'alarme chez les oiseaux ou les tritons.

## Se reproduire avec succès

La capacité des individus à se reproduire avec succès détermine directement la dynamique des populations et garantit la pérennité même de leur espèce. La reproduction implique différentes étapes, depuis la recherche de partenaires et du lieu de reproduction jusqu'à l'élevage de la progéniture. À toutes ces étapes, la perception sensorielle est indispensable. Cette dernière permet notamment une communication fluide entre mâles et femelles, puis entre parents et jeunes, dont dépendent la survie juvénile et le succès reproducteur.

À titre d'exemple, le choix du partenaire implique des signaux auditifs chez les grenouilles, des stimulus olfactifs chez les serpents et les sauterelles et des indices visuels chez les odonates. Au sein d'un couple de macaques de Barbarie (*Macaca sylvanus*), les vocalisations des femelles renseignent les mâles sur leur disponibilité reproductive. Les oisillons se fient aux vocalisations de leurs parents et les jeunes lézards à l'odeur de leur mère. Chez le lapin, la fixation au mamelon par les nouveau-nés se fait par communication phéromonale en mettant en jeu des indices olfactifs appris pendant la période prénatale. Des études

sur des coléoptères ont montré que les parents informent leur progéniture de la préparation au ravitaillement en émettant une phéromone spéciale qui suscite en retour un comportement de quémandage.

### Boîte à outils sensorielle

Ces différents exemples mettent en lumière que chaque sens possède des avantages et des inconvénients en fonction des circonstances. Les organismes sont ainsi généralement équipés d'une « boîte à outils sensorielle ». Ces facultés sensorielles plurielles procurent deux grands intérêts :

– efficacité. Les animaux mobilisent des sens différents selon les situations et les contextes (ex. : jour ou nuit, milieu fermé ou ouvert, loin ou près de la source). Ils peuvent ainsi privilégier le sens le plus efficace dans une situation donnée ;

– complémentarité. Les animaux mobilisent plusieurs sens en même temps afin de croiser les informations et les rendre plus fiables. Par exemple, certains rapaces utilisent de manière équivalente la vue et l'olfaction pour repérer leur nourriture, de même que des oiseaux insectivores pour repérer les arbres favorables. Chez l'araignée-loup (*Schizocosa rovnéri*), le choix des mâles se fait par des indices visuels et olfactifs. Chez la drosophile (*Drosophila melanogaster*), la détection d'un concurrent mobilise une multitude d'indices sensoriels complémentaires — auditifs, olfactifs, visuels, tactiles, etc. Nous disposons de nombreux exemples dans le règne animal montrant cette complémentarité sensorielle, notamment entre vision et odorat. Toutefois, la manière dont les différents stimulus sont intégrés et hiérarchisés dans le système nerveux central reste encore à comprendre.

Arrivés à la fin de ce premier chapitre, nous mesurons la place de la perception sensorielle dans le monde vivant. Nous comprenons que les sens jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement écologique en permettant aux animaux de comprendre leur environnement et d'interagir entre eux. Nous allons maintenant mettre ces éléments en relation avec la dimension spatiale, et en particulier à l'échelle du paysage.



## 2. QU'EST-CE QU'UN PAYSAGE SENSORIEL ?

Jusqu'à aujourd'hui, la perception sensorielle a principalement intéressé les biologistes, les éthologues et les écologues pour comprendre les réactions comportementales ou le fonctionnement au sein d'une population, beaucoup moins dans une approche spatialisée. Il existe toutefois certains sujets spécifiques au travers desquels la perception sensorielle a été prise en compte en relation avec la dimension spatiale. On peut citer les études sur les vecteurs de maladies (ex. : moustiques, punaises hématophages) ou les travaux en herpétologie sur la sélection de microhabitats en fonction de la perception thermique. Néanmoins, ces travaux ont été menés dans une approche épidémiologique et écophysiologique sans que le paysage soit la porte d'entrée.

L'échelle du paysage reste ainsi peu explorée en lien avec la perception sensorielle. Pourtant, de nombreuses questions se posent à cette échelle : comment les individus composent-ils avec la diversité des signaux sensoriels qui les entourent et qui véhiculent des informations parfois antagonistes ? Dans quelle mesure la dimension sensorielle confère-t-elle une spécificité à certains paysages au point de faire naître des paysages visuels diurnes ou nocturnes, sonores et olfactifs ? Et tout simplement : qu'est-ce qu'un paysage sensoriel ? Ce chapitre se propose d'y répondre.

### DU PAYSAGE PHYSIQUE AU PAYSAGE SENSORIEL

#### Le paysage en écologie

Le paysage est un « objet » atypique qui, aujourd'hui encore, reste difficile à définir. Des disciplines très diverses manipulent cette notion, de l'art à l'écologie en passant par la géographie, l'urbanisme ou la sociologie. Le paysage peut en effet être appréhendé avec une lecture esthétique, culturelle, historique, patrimoniale, fonctionnelle, écologique, et de bien d'autres manières encore.

En 2000, une définition officielle a été posée par le Conseil de l'Europe pour essayer de cadrer les choses, au sein de la Convention européenne du paysage signée à Florence. Le paysage y est alors défini comme « une partie de territoire telle que perçue par les populations, dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ou humains et de leurs interrelations ».

Si cette définition a le mérite de fixer les choses, on remarque un certain parti pris : le paysage n'existe qu'en présence d'un observateur humain, il est donc subjectif, une réalité perçue. Cette approche ne correspond pas avec d'autres acceptions, et notamment celle portée par l'écologie du paysage.

D'abord apparue aux États-Unis puis en Europe, et notamment en France, l'écologie du paysage est une sous-discipline de l'écologie née dans les années 1980. Elle vise à étudier les êtres vivants non plus à l'échelle de l'écosystème, mais à cette échelle du paysage, défini alors comme un simple cadre d'étude. L'association internationale référente — l'International Association for Landscape Ecology (IALE) — définit l'écologie du paysage comme « l'étude de la variation [des conditions environnementales] dans et entre les paysages à différentes échelles spatiales et temporelles. Elle cherche à comprendre les causes biophysiques et sociales de l'hétérogénéité paysagère et leurs conséquences ».

Pour l'écologue, le paysage est donc débarrassé de ses attributs subjectifs, il correspond à une échelle spatio-temporelle de travail. Le paysage permet d'appréhender plus facilement la dimension spatiale du vivant, alors que l'écosystème est un concept plus adapté pour comprendre les fonctions de chaque espèce, leurs interrelations ou encore les cycles de la matière (carbone, eau, etc.). L'échelle à laquelle on considère ce paysage en écologie dépend de la question posée.

L'une des motivations de l'écologie du paysage est de mieux comprendre comment la nature et l'organisation des éléments qui composent ce paysage influencent les processus écologiques, à la fois la vie et la mobilité (flux de gènes et d'individus). Les éléments paysagers considérés sont aussi bien naturels



qu'anthropiques, mais avant tout physiques ; par exemple, forêts et milieux agricoles d'un côté *versus* infrastructures de transport et zones urbanisées de l'autre.

La définition du paysage telle que proposée par la Convention de Florence, en intercalant un biais humain observateur, n'est pas compatible avec une analyse factuelle de ce type. *A contrario*, la définition «pratico-pratique» du paysage en écologie fait abstraction de sa dimension perceptive. Elle invite à analyser les dynamiques du vivant, sans se mettre pour autant à la place des organismes pour interroger comment ceux-ci perçoivent véritablement leur propre paysage.

Pourtant, la notion de «paysage perçu» peut s'appliquer à tout être vivant, humain ou non. Chaque individu perçoit le monde qui l'entoure à sa manière, non seulement selon ses capacités sensorielles, mais probablement aussi au travers de critères subjectifs. Pourquoi les animaux non humains n'auraient-ils pas eux aussi des filtres «esthétiques», «historiques» ou «culturels» quand ils décryptent l'espace qui les entoure ? Bien que partageant un même espace géographique aux caractéristiques physiques identiques, des organismes d'un même écosystème vivent des réalités extrêmement différentes. C'est ainsi que le biologiste allemand Jakob von Uexküll parle de «monde propre» (*Umwelt* en allemand). Il pose l'idée que chaque être vivant possède son monde sensoriel à lui. Le paysage apparaît alors comme une notion intéressante pour développer cette approche. Mais comment définir les paysages sensoriels ?

### Comment définir le paysage sensoriel ?

Des chercheurs ont défini en 2014 le paysage sensoriel comme «la distribution spatiale et temporelle de tous les stimulus émis dans l'environnement d'un organisme»<sup>3</sup> (Jurcak et Moore, 2014). On remarque que cette définition adopte à nouveau une approche purement factuelle ; le paysage sensoriel est la structure spatiale et temporelle des signaux qu'il contient. Cette structure est déterminée par l'interaction des différents

---

3. "We define a sensory landscape as the spatial and temporal distribution of all of the stimuli within an organism's environment" (traduction de l'auteur).

stimulus entre eux et avec les propriétés physiques et chimiques de l'environnement (ex. : air, eau, topographie, végétation). Ces stimulus sensoriels se côtoient, se cumulent, s'amplifient, se masquent. Un paysage sensoriel est constitué d'une multitude de signaux à la fois abiotiques et biotiques : tout en recevant les signaux, un animal en émet aussi par son apparence visuelle, ses manifestations vocales, ses émissions d'odeurs.

En complément, une autre approche pour définir le paysage sensoriel pourrait partir de l'individu. En effet, bien que la situation physico-chimique des signaux sensoriels dans un espace donné soit identique pour tous les animaux fréquentant cet espace, chaque individu percevra les choses à sa manière, notamment en fonction de ses capacités sensorielles et de ses facultés cognitives. Le paysage sensoriel est donc le paysage perçu par un animal donné. Plus précisément, ce paysage sensoriel résulte de différents « sous-paysages sensoriels » : le paysage visuel, le paysage sonore, le paysage olfactif. En effet, un individu va apprécier les différents espaces dont il est le centre. Notamment, certains seront décrits par sa vue, d'autres par son ouïe, d'autres par son odorat. Chacun de ces espaces possède ses propres périmètres, compositions, rythmes ; ils ne se superposent pas. Par exemple, le paysage visuel d'un animal au sein d'une forêt sera probablement limité par l'épaisseur de la végétation, alors que l'animal percevra sûrement des sons ou des odeurs au-delà du couvert boisé. Un même individu perçoit ainsi des paysages différents selon le sens qu'il mobilise et dont il fait la synthèse, aboutissant à une compréhension complexe de son environnement que l'on pourrait appeler un « métapaysage sensoriel ».

Cette réflexion nous amène à mieux identifier les limites des définitions du paysage, à la fois de l'écologie du paysage et de la Convention de Florence, et à faire évoluer ces deux conceptions pour :

– introduire la dimension sensorielle dans la définition du paysage pour l'écologie, et ce de deux manières :

- en prenant en compte les données supplémentaires des signaux sensoriels qui composent le paysage — en complément des éléments « physiques » — pour comprendre la structuration des populations et leur dynamique spatio-temporelle. À l'instar



du paysage physique, le paysage sensoriel peut s'analyser par sa composition (nature des stimulus et leurs caractéristiques : intensité, durée, fréquence, direction, etc.) et son organisation (distribution spatio-temporelle des stimulus, hétérogénéité). Les flux sensoriels (et donc informationnels) au sein du paysage peuvent aussi devenir un nouvel objet d'intérêt pour l'écologie du paysage, en complément des flux de gènes et d'individus,

- en se mettant à la place d'un individu donné pour tenter de décrire le paysage tel qu'il le perçoit, en tenant compte *a minima* des facultés sensorielles de l'espèce à laquelle on s'intéresse. Cette proposition est la plus difficile à mettre en œuvre, du fait de la variabilité individuelle inhérente à la perception sensorielle ;

– élargir aux non-humains la notion de perception intelligemment introduite par la Convention de Florence. Pour être plus inclusif, le paysage pourrait être défini comme « une partie de l'espace géographique telle que perçue par un être vivant, végétal ou animal, humain ou non-humain, dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ou anthropiques et de leurs interrelations ». Cette définition revisitée pourrait ainsi faire consensus pour divers champs disciplinaires (écologie, sociologie, aménagement du territoire, etc.) qui utilisent le concept de paysage.

Ce mariage entre écologie du paysage et perception sensorielle ne demande en réalité pas grand-chose, car nous ne partons pas de rien. Il s'agit de faire converger des thématiques préexistantes qui jusqu'ici se sont peu parlé : d'un côté, l'écophysiologie, l'éthologie, la biologie évolutive, qui ont produit de vastes connaissances sur la perception sensorielle, et, de l'autre, l'entrée paysage avec la finalité que lui confère l'écologie, à savoir comprendre le fonctionnement du vivant à cette échelle spatio-temporelle.

### Stimulus informatifs et non informatifs, attractifs ou répulsifs

Comme nous l'avons dit, un espace donné est composé de très nombreux stimulus sensoriels, de natures différentes et émanant de diverses sources biotiques et abiotiques — et, nous le verrons plus tard : anthropiques. Un individu donné se retrouve alors immergé en permanence dans un environnement sensoriel complexe et dynamique.

Dans ce « brouhaha » sensoriel, chaque individu doit discerner les stimulus non informatifs (neutres) et les stimulus informatifs. Parmi ces derniers, certains correspondront à ce qu'il recherche (habitat, nourriture, partenaire potentiel) et d'autres à ce qu'il doit éviter (compétiteurs, prédateurs, ressources inappropriées). On distingue ainsi deux grands types de stimulus informatifs en fonction des réactions qu'ils peuvent engendrer sur le plan spatial : les stimulus attractifs — qui vont générer une appétence et une attirance — et les stimulus aversifs — qui vont entraîner la fuite ou l'évitement.

Des scientifiques se sont particulièrement intéressés aux stimulus aversifs au sein d'un paysage, en particulier ceux impliqués dans la relation proies-prédateurs. Certains auteurs ont introduit la notion de « paysage de la peur », qui traduit la perception du risque par un individu, généralement une proie, dans son paysage. Nous verrons plus loin que la lumière artificielle nocturne amplifie le paysage de la peur en rendant les individus plus visibles.

Cette distinction entre attractif et répulsif est une grille de lecture simplificatrice (binaire), mais intéressante à l'échelle du paysage pour relier les déplacements à la perception sensorielle. Entre ces deux opposés « attraction *versus* répulsion », il existe tout un espace de réactions. Tout d'abord, les réactions physiologiques, métaboliques, biologiques n'engendrent pas toutes un déplacement dans l'espace. Sur le plan spatial ensuite, il existe aussi une palette de réactions comportementales possibles, soit parce que certains signaux sont sans intérêt pour l'individu (non informatifs), soit parce qu'il y a une certaine habitude, soit parce que les stimulus informatifs vont être analysés comme ne nécessitant pas de réponse (ex. : je détecte un prédateur mais il n'est pas dans une attitude d'attaque).

Entre tous les stimulus informatifs attractifs et répulsifs, l'individu devra synthétiser et hiérarchiser les informations perçues pour les mettre en balance. Par exemple, la détection d'un partenaire à proximité (stimulus attractifs) sera contrebalancée par la perception d'un prédateur proche (stimulus aversifs), amenant finalement l'animal à la réaction (ou prise de



décision) adéquate : peut-être l'animal laissera-t-il échapper l'opportunité de la rencontre avec le partenaire potentiel pour éviter le danger.

## PAYSAGES VISUELS NOCTURNES, SONORES ET OLFACTIFS : LES OUBLIÉS DU PAYSAGE ?

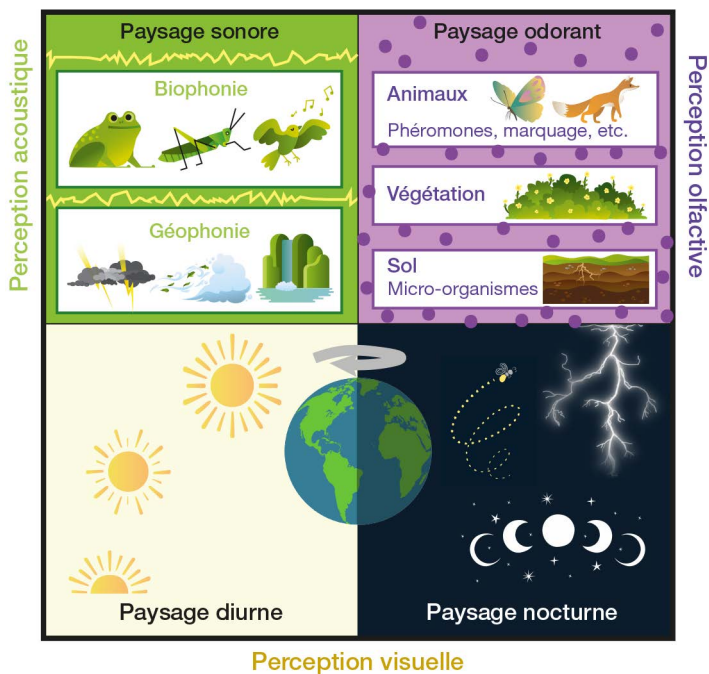
Nous avons souligné jusqu'ici que la dimension sensorielle était peu présente dans la conception du paysage en écologie. Plus exactement — dans ce cadre d'étude que constitue le paysage pour l'écologue —, le paysage a en réalité été essentiellement considéré comme un paysage diurne et perçu visuellement, mais ceci s'est fait implicitement. L'être humain étant un animal diurne et très centré sur sa vision, c'est naturellement, par un anthropocentrisme inconscient, que le paysage a été appréhendé de cette manière et que cette façon d'entrer dans le monde a été transposée au reste des vivants. Mais cette lecture est très partielle par rapport à la diversité des paysages sensoriels et à la diversité des sens à disposition des organismes (figure 3).

D'une part, l'alternance du jour et de la nuit génère des paysages visuels aux niveaux de luminosité très contrastés, différenciant des paysages visuels diurnes et des paysages visuels nocturnes. Pour se représenter l'ordre de grandeur, la luminance de la Lune est environ 6 millions de fois plus faible que celle du Soleil<sup>4</sup> ! Cette photopériode naturelle a structuré la sélection naturelle, la formation des systèmes sensoriels et la répartition des niches écologiques temporelles, avec, chez certains taxons, une dissymétrie au profit de l'activité nocturne. Au sein des paysages visuels, nous nous concentrerons dans cet ouvrage sur les paysages visuels nocturnes, du fait que nous traitons des effets de l'éclairage artificiel nocturne.

D'autre part, les sons naturels, émis à la fois par les organismes (toutes les productions sonores des êtres vivants : chants, cris,

---

4. La luminance est la quantité de lumière émise rapportée à la surface d'émission, exprimée en candela par mètre carré ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ). La luminance du Soleil dépasse  $10^9 \text{ cd}/\text{m}^2$ , et celle de la Lune (vue à travers l'atmosphère claire) avoisine les  $2,5 \times 10^3 \text{ cd}/\text{m}^2$ .



**Figure 3.** Illustration des paysages sonores, olfactifs et visuels (diurnes et nocturnes) (source : Sordello, 2024).

Dans une approche purement physique, les paysages visuels sont ceux qui sont directement impactés par l'alternance jour-nuit, même si les paysages sonores et olfactifs varient également entre le jour et la nuit.

rugissements, etc., formant la biophonie) et les éléments (tonnerre, vent, pluie, torrents, etc., formant la géophonie), créent les paysages sonores.

Enfin, les molécules volatiles produites par les micro-organismes du sol et la végétation créent les paysages odorants, avec parfois une signature olfactive typique. Ces odeurs influencent les cortèges d'animaux dépendants des plantes (herbivores, granivores, nectarivores, parasites, phytophages), et donc la composition des écosystèmes.

Dans une approche purement astrophysique (présence-absence du Soleil), nous considérons dans cet ouvrage que c'est avant



tout le paysage visuel qui est impacté par l'alternance jour-nuit. Toutefois, l'alternance jour-nuit a des conséquences sur l'activité biologique, donc les paysages sonores et olfactifs ont également leur rythme diurne-nocturne.

### Paysages visuels nocturnes

Depuis des milliards d'années, la rotation de la Terre génère, sous nos latitudes, l'enchaînement d'une période éclairée par le Soleil — le jour — et d'une période d'obscurité où le Soleil est caché — la nuit. Cette alternance jour-nuit génère des paysages aux niveaux photopiques très contrastés : des paysages diurnes et des paysages nocturnes. L'éclairement est environ 200 000 fois plus fort le jour que la nuit<sup>5</sup>. La nuit, la lumière naturelle n'est apportée que par le ciel étoilé. La Lune représente la source de lumière principale mais intermittente et dynamique (selon ses différentes phases, horaires, saisons, etc.).

Ce cycle jour-nuit qui s'étend sur 24 h (que l'on appelle « cycle nyctéméral ») est lui-même soumis à des variations annuelles — durée du jour-durée de la nuit — du fait que la Terre tourne autour du Soleil. Des nuances sont aussi liées à la topographie, à la végétation, à la profondeur dans l'eau pour les systèmes aquatiques. De même, la météo (couverture nuageuse) peut modifier sensiblement l'ambiance lumineuse, de jour comme de nuit.

La variabilité introduite par les différentes phases de la Lune, de la nouvelle lune à la pleine lune, est infime par rapport au contraste jour-nuit. Pourtant, cette variabilité est suffisante pour induire des modifications comportementales, par accentuation ou inhibition. D'un côté, la luminosité lunaire peut amplifier des indices visuels, comme le plumage des oiseaux nocturnes, ce qui stimule l'activité sexuelle. De l'autre, cette luminosité alimente le paysage de la peur (perception du risque de prédation), notamment chez les espèces proies. C'est en tout cas l'hypothèse avancée pour expliquer que — à mesure que la Lune

---

5. L'éclairement correspond à la quantité de lumière reçue par unité de surface, exprimée en lux (lumen/m<sup>2</sup>). Le jour, en été par temps dégagé à midi, l'éclairement au sol se situe autour de 100 000 lux. Lors d'une nuit de pleine lune, en été par temps clair et dans un endroit dégagé, sous nos latitudes, le sol reçoit maximum 0,5 lux.

croît — certaines espèces réduisent leur activité, décalent leurs horaires de sortie, empruntent des zones plus sombres, voire sont totalement inhibées. Ce phénomène souligne le niveau de sensibilité de la faune nocturne aux variations de luminosité.

Enfin, d'autres stimulus lumineux naturels existent la nuit, d'origine abiotique (éclairs) et biotique (bioluminescence, phosphorescence). Par exemple, des insectes coléoptères au sein de la famille des Lampyridae (lucioles et vers luisants) pratiquent la bioluminescence grâce à un métabolisme particulier. Leur lumière jaune-vert, continue ou clignotante, favorise la vision et sert aussi à la communication, notamment entre mâles et femelles. Dans certains cas, l'émission de lumière peut aussi relever d'une stratégie antiprédateur en avertissement d'un risque (réel ou non) de toxicité (on parle de signaux aposématiques).

L'alternance jour-nuit est un ordre établi, immuable et stable, qui a précédé l'apparition de la vie et a donc totalement structuré l'évolution du vivant. Elle a constitué une force sélective fondée à la fois sur la lumière comme signal sensoriel (vision) et sur la lumière comme signal temporel (horloges biologiques). Une estimation indique qu'environ 28% des vertébrés et 64% des invertébrés qui composent aujourd'hui la biodiversité sont actifs la nuit (Hölker *et al.*, 2010). Par exemple, en France métropolitaine, on recense 5 000 espèces de papillons de nuit pour 253 espèces de papillons diurnes.

Cette «nocturnité» est toutefois variable. Certaines espèces sont strictement nocturnes toute l'année quand d'autres le sont épisodiquement. On constate aussi que de nombreuses espèces sont en réalité plutôt actives en début et en fin de nuit. On parle de rythme d'activité «bimodal», avec deux pics marqués au crépuscule et à l'aube. Chouettes, chauves-souris, papillons de nuit, cervidés suivent ce rythme. Bien qu'aucune quantification n'existe, ces deux périodes charnières entre jour et nuit concentrent peut-être une grande partie de l'activité dans les écosystèmes.

Vivre le jour, donc exposé à la lumière du Soleil, présente des avantages (notamment pour la vision), mais aussi divers



risques (altération de l'ADN, dessiccation, visibilité par des prédateurs). En contrepartie, vivre la nuit implique soit d'être doté de systèmes visuels particuliers, améliorant la vision dans la pénombre, soit de mobiliser d'autres sens ne dépendant pas de la lumière. On remarque chez les espèces nocturnes utilisant la vision différentes caractéristiques leur permettant d'optimiser la luminosité : de gros yeux, des bâtonnets plus nombreux, un tapis réfléchissant au fond de l'œil, ou encore la perception des infrarouges et/ou des ultraviolets. Par ailleurs, les espèces nocturnes ont peu de repères paysagers à leur disposition, elles se servent du ciel étoilé comme d'une carte géographique. Parmi les autres sens mobilisés la nuit, on peut citer l'écholocation (principe du sonar) chez les chauves-souris ou les cétacés (capacité à lire son paysage *via* l'écho de ses propres sons), ou la thermoréception chez les serpents (capacité à percevoir les nuances très subtiles de température, ce qui permet de décrypter son paysage).

Mais alors, la vie nocturne a-t-elle été la situation « par défaut » ou la forme adaptative ? *A priori*, la vie sur Terre se serait d'abord épanouie dans l'océan profond, dont la noirceur est permanente. Les organismes ont ensuite peu à peu colonisé la colonne d'eau jusqu'à la surface, et enfin se sont propagés sur la terre ferme, se confrontant ainsi au cycle jour-nuit. Mais quelle niche temporelle a été privilégiée ? Cette histoire évolutive est difficile à retracer aujourd'hui.

Dans tous les cas, les deux périodes charnières crépuscule-aube représentent une forme de compromis qui peut expliquer leur « succès ». Leur niveau photopique de moyenne intensité maximise la capacité à voir son environnement tout en étant le moins vu possible (de ses proies et de ses prédateurs), ce que tend à rechercher tout animal.

### Paysages sonores

On considère généralement les paysages sonores comme constitués de deux sous-ensembles :

– la géophonie, formée par les sons d'origine abiotique, tels que les vagues, le tonnerre, les mouvements du sol, le vent, la pluie, les torrents et les cascades ;

– la biophonie, formée par les sons d'origine biotique, comprenant toutes les productions sonores des êtres vivants (souffles, claquements, sifflements, rugissements, chants, cris, vocalisations).

La biophonie est le résultat de la communication acoustique animale qui permet de dialoguer avec des conspécifiques, son partenaire ou sa progéniture, de faire fuir un prédateur ou de défendre un territoire.

On rencontre une grande diversité d'« instruments » chez les animaux produisant des sons : cordes vocales, sacs vocaux, feuilles nasales, battements des ailes, vibrations de l'abdomen, etc. Chez certains taxons comme les oiseaux, les mâles sont plus prolifiques que les femelles et émettent de véritables « chants ». Ces chants servent à défendre un territoire contre des compétiteurs ou à attirer une femelle.

Au cours de l'évolution, l'émergence de manifestations acoustiques s'est faite en étroite relation (et en réaction) avec la géophonie et la biophonie existantes. En effet, l'espace-temps sonore n'est pas extensible à souhait. Cela implique un partage au sein des vivants, chaque organisme ayant comme intérêt de rester audible dans ce fond sonore en évitant les chevauchements. Cette partition en « niches écologiques sonores » peut concerner la temporalité des manifestations vocales ou encore les plages de fréquences utilisées. Par exemple, les chauves-souris sont plutôt spécialisées dans les ultrasons, avec une gamme de 10kHz à 110kHz selon les espèces. Finalement, cette force évolutive a engendré une grande diversité de manifestations acoustiques — gammes de fréquences, amplitudes, motifs, timbres, harmonies, répétitions —, optimisant le paysage sonore.

La notion de paysage sonore a d'abord été introduite par le compositeur Schafer dans les années 1970, dans un ouvrage de référence, *The Soundscape, Our Sonic Environment and the Tuning of the World* (Schafer, [1977] 1993<sup>6</sup>). Ce musicologue a défini le paysage sonore de manière relativement anthro-

6. *Le paysage sonore : notre environnement sonore et l'harmonie du monde* (traduit en français par l'auteur).



pocentrée, comme « notre environnement sonore, l'ensemble des bruits omniprésents avec lesquels nous vivons tous »<sup>7</sup>. La notion de paysage sonore a ensuite diffusé dans différentes disciplines, y compris depuis une dizaine d'années dans l'écologie. Des chercheurs l'ont défini en 2011 comme « l'ensemble des sons biologiques, géophysiques et anthropiques qui émanent d'un paysage et qui varient dans l'espace et dans le temps »<sup>8</sup> (Pijanowski *et al.*, 2011).

Les paysages sonores naturels témoignent d'une « signature acoustique » résultant de la biophonie et de la géophonie. Cette signature est caractérisée par une intensité, une diversité, une dynamique spatio-temporelle. On sait notamment que la biophonie varie elle aussi selon le rythme jour-nuit et selon les saisons. Dans les régions nordiques et tempérées, les oiseaux, les amphibiens ou les insectes vocalisent surtout au printemps et jusqu'à l'été, quand la défense des territoires ou la recherche d'un partenaire sont les plus marquées. Les ornithologues connaissent aussi très bien le *chorus*, ce concert impressionnant des oiseaux le matin (et le soir).

De plus en plus, le paysage sonore est désormais utilisé en écologie acoustique comme un indicateur. Le développement des techniques d'enregistrement, actives et surtout passives, a révolutionné la possibilité de récolter de manière peu invasive des informations pour le suivi et la protection de la biodiversité. Ces enregistrements sonores permettent de décrire la richesse en espèces, mais aussi d'estimer des abondances et d'observer des variations spatiales et temporelles, éventuellement explicables par certains facteurs biotiques, abiotiques ou anthropiques.

### Paysages olfactifs

Le paysage olfactif (ou odorant) reste probablement le moins conceptualisé des trois paysages sensoriels. Paradoxalement, la notion de paysage olfactif a été introduite il y a déjà quelques

---

7. "Soundscape is our sonic environment, the ever-present array of noises with which we all live" (traduit de l'anglais par l'auteur).

8. "The collection of biological, geophysical and anthropogenic sounds that emanate from a landscape and which vary over space and time" (traduit de l'anglais par l'auteur).

décennies pour des organismes marins. Mais, concernant les écosystèmes terrestres, ce n'est que récemment que ce concept a émergé, et il reste aujourd'hui étudié surtout pour les insectes (Conchou *et al.*, 2019).

Nous savons néanmoins que les êtres vivants émettent tous des odeurs. En particulier, la végétation, aussi bien herbacée qu'arborée, émet une multitude de COV (décrits précédemment) à la base des odeurs. Les micro-organismes du sol (ex. : champignons, bactéries) constituent également une source majeure d'émission de COV dans un écosystème terrestre. Les réactions chimiques par lesquelles ils recyclent la matière organique en décomposition, végétale comme animale, relarguent en effet énormément de gaz.

Les odeurs émises par les végétaux entrent en jeu dans les interactions plantes-animaux, en particulier les insectes, et sont le résultat là encore d'une coévolution. D'une part, les insectes les utilisent pour détecter les ressources végétales-florales. Certaines plantes vont même émettre des molécules mimant les phéromones d'insectes pollinisateurs pour les attirer, ou être synchronisées avec la réceptivité olfactive de ces derniers. D'autre part, les molécules odorantes émises par les végétaux peuvent repousser certains animaux, pathogènes ou phytophages, et sont donc un moyen de défense des plantes. Les molécules odorantes émises par la végétation structurent de ce fait les écosystèmes, directement sur les cortèges d'espèces dépendants des plantes (herbivores, granivores, nectarivores, parasites) et indirectement sur le reste des cortèges. Constituant la base des habitats naturels terrestres, la végétation joue ainsi un rôle « fondateur » dans la composition des paysages odorants par son fond (*background*) permanent d'odeurs. Les associations végétales confèrent même des « signatures olfactives » aux habitats naturels, reconnaissables par les animaux et notamment par l'entomofaune.

Les animaux émettent eux aussi des odeurs, par leur peau, leur système respiratoire, leur urine, leurs excréments. Ces émanations peuvent être involontaires lorsqu'elles résultent du métabolisme (ex. : transpiration, haleine, digestion) ou au contraire



contrôlées. Certains animaux déposent en effet délibérément leurs odeurs lorsqu'ils marquent leur territoire d'empreintes olfactives afin d'informer d'autres individus. Ces signaux pourront être attractifs ou aversifs selon les récepteurs (ex. : individu en quête d'un partenaire *versus* une proie potentielle).

Quelle que soit leur origine (végétale, microbienne, fongique ou animale), ces odeurs sont émises à des moments, des rythmes, des intensités, des localités différentes dans un paysage. Les paysages odorants sont donc eux aussi profondément dynamiques. Par exemple, les insectes vont émettre des phéromones à certains moments particuliers de leur cycle de vie. La propagation du signal est ensuite étroitement liée aux flux d'air qui portent les composés volatils plus ou moins loin et dans des conditions plus ou moins bonnes.

## LA PERCEPTION SENSORIELLE À L'ÉCHELLE DU PAYSAGE

### Habitats et corridors : vivre et se déplacer

Pour accomplir leur cycle biologique, les espèces ont besoin à la fois d'habitats favorables et de pouvoir se déplacer librement :

– on peut définir simplement l'habitat d'un individu comme le lieu où cet individu vit. L'habitat est ce qui offre à l'individu des ressources alimentaires, des cachettes, une zone d'hivernage, un site de nidification, lui permettant ainsi de se nourrir, se reposer, se protéger, se reproduire. Les espèces expriment des besoins très variés à ce sujet, notamment en ce qui concerne la surface minimale d'habitat requise ;

– les activités d'un individu s'organisent généralement dans des espaces géographiques différents (ex. : zones de chasse, zones d'hivernage, zones de repos), ce qui implique un transit au sein de son habitat, voire entre plusieurs parties d'habitats éloignées. Ces déplacements peuvent être quotidiens, pendulaires (migration) ou exceptionnels (dispersion). Là encore, les besoins de mobilité varient entre les taxons, mais la perméabilité d'un paysage reste indispensable. Cette perméabilité permet notamment d'assurer un brassage génétique de la reproduction sexuée.

L'écologie du paysage s'est particulièrement intéressée à ces deux besoins en distinguant, dans un paysage, deux grands types d'éléments :

- les « taches » (*patch* en anglais), qui correspondent aux ensembles surfaciques d'habitats relativement homogènes et favorables ;
- les « corridors », qui sont les structures du paysage (ex. : haies, ripisylves), contiguës ou continues, assurant plus spécifiquement une fonction de déplacement.

Le « reste » du paysage est généralement qualifié de « matrice », un milieu plus ou moins hostile ne permettant pas de manière optimale la vie ou le déplacement des individus.

Certes, cette grille de lecture est une simplification de la réalité, mais elle offre de nombreuses opportunités pour analyser un paysage. Les taches et les corridors constituent des « motifs » pouvant être décrits (ex. : nature, nombre, forme, surface, densité, répartition, connexions) afin de calculer divers indices paysagers (ex. : taille moyenne, indice d'agrégation, distance euclidienne moyenne au plus proche voisin, dimension fractale, indice de contagion). Cela permet de comparer des paysages entre eux, d'évaluer leur fonctionnalité et de suivre leur évolution.

### La perception sensorielle, un guide pour la sélection des habitats favorables

La sélection d'un habitat a des conséquences importantes pour un individu, car elle va déterminer sa condition physique, son succès reproducteur et sa survie. La qualité d'un habitat va dépendre de la disponibilité en nourriture, de la présence de conspécifiques ou encore du risque potentiel de rencontrer un prédateur. Au sein d'un paysage constitué de multiples possibilités plus ou moins favorables, les organismes utilisent leur perception sensorielle pour choisir les meilleurs habitats possibles. Ils vont alors s'appuyer sur des marqueurs visuels, sonores et olfactifs, que l'on va appeler des « indices sensoriels ».

Par exemple, des moucheron piqueurs de grenouilles choisissent leur habitat en fonction de la signature acoustique du *chorus* des grenouilles. Chez des souris, les femelles préfèrent les odeurs



des mâles vivant dans des habitats de meilleure qualité. Une expérience avec des serpents a révélé que des odeurs de proies sont un critère favorisant la sélection des habitats. À l'inverse, des souris évitent des zones de recherche de nourriture où des signaux sensoriels d'un prédateur ont été disséminés. Une expérience a montré que le guano (excrément) de chauves-souris augmente la probabilité d'occurrence de leurs prédateurs. À plus large échelle, diffuser des chants d'oiseaux compétiteurs fait diminuer la richesse spécifique de l'avifaune sur un site. Les insectes utilisent, quant à eux, des indices olfactifs libérés par la végétation sur une zone relativement étendue. Ces indices détectables à longue distance les renseignent sur la qualité d'un site, notamment sur la présence de leurs plantes hôtes.

Ces exemples montrent qu'un habitat ne peut être décrit uniquement par des caractéristiques stationnelles (topographie, exposition, pluviométrie, structure et forme de la végétation). Ses caractéristiques visuelles, acoustiques et olfactives lui confèrent aussi une spécificité sur laquelle les organismes se baseront pour apprécier sa valeur.

### Des signaux sensoriels pour orienter la navigation

Le fait qu'un individu se déplace dans son paysage peut être une conséquence de facteurs externes (en réaction à un stimulus donné, tel qu'un prédateur ou une proie détectée) ou de facteurs internes (ex. : physiologiques, métaboliques, hormonaux). Notamment, en ce qui concerne la dispersion, le moteur n'est pas toujours extérieur. Dans les deux cas, les individus utilisent ensuite les indices sensoriels pour se guider : atteindre un but, optimiser un trajet, anticiper et éviter les dangers. La vue, l'ouïe et l'odorat fonctionnent à plus ou moins grande distance, et, dans tous les cas, ils ne nécessitent pas de contact direct avec la source d'émission. Ces sens sont donc particulièrement avantageux pour la navigation dans l'espace.

L'utilisation de l'odorat est fréquente chez les mammifères mais existe aussi chez des oiseaux et des amphibiens. Elle est particulièrement documentée chez les insectes. Par exemple, des fourmis savent retrouver leur chemin uniquement par l'odorat ; des abeilles s'orientent aux odeurs des fleurs et évitent des fleurs

occupées par des fourmis prédatrices grâce à l'olfaction. La faune du sol (collemboles, vers de terre) est également attirée par l'odeur des champignons et des micro-organismes.

La perception visuelle est un facteur majeur pour s'orienter. Des éléments ponctuels servent d'indices visuels, par exemple la couleur des fleurs ou la structure d'un arbre. À plus vaste échelle, des éléments paysagers comme les cours d'eau, les haies, la topographie sont des repères visuels lors de la navigation. Le niveau de luminosité est en soi une information visuelle pour les déplacements de certaines espèces. De jour, le Soleil représente un repère essentiel pour les animaux. De nuit, certaines espèces continuent de mobiliser leur vue grâce à leur vision scotopique. Elles utilisent alors les repères lumineux naturels comme la Lune, la configuration des étoiles, la rotation du ciel nocturne autour du pôle céleste, la Voie lactée.

Les espèces équipées d'un sonar, comme les chauves-souris, naviguent en analysant l'écho de leurs propres sons — généralement des ultrasons — et souvent en complément de la vue. Les oiseaux marins utiliseraient les infrasons dans leur navigation.

Comme nous l'avons vu précédemment, certains stimulus informatifs peuvent être interprétés comme attractifs et d'autres comme aversifs. Sur le plan spatial, il en résulte alors des déplacements orientés « vers ou contre ». On parle ainsi de tactisme positif (l'animal se dirige vers la source) ou négatif (l'animal évite la source ou s'en éloigne). Selon la nature du stimulus qui déclenche cette réaction, il est question de phototactisme pour la lumière, de phonotactisme pour le son et de chimiotactisme pour les odeurs (tableau 2). Par exemple, des preuves de phonotactisme existent chez les amphibiens et les arthropodes, notamment les orthoptères.

Naviguer dans l'espace est une tâche complexe qui nécessite de « jongler » avec ces différents signaux sensoriels. Cela implique de percevoir et de réagir promptement aux informations biotiques et abiotiques qui composent l'environnement et qui sont parfois antagonistes. Aussi les sources d'informations peuvent-elles être elles-mêmes en mouvement (ex. : individus qui bougent, signaux chimiques qui sont transportés au gré des courants d'air).

**Tableau 2.** Exemple de tactisme pour les trois stimulus : lumineux, sonores et olfactifs.

Tactisme	Positif	Négatif
	● ←	● →
Phototactisme	Orientation avec le Soleil ou le ciel nocturne Attraction mâle-femelle chez les espèces bioluminescentes	Effet lucifuge de la pleine lune sur certains taxons Signaux lumineux aposématiques* contre des prédateurs
Phonotactisme	Repérage acoustique de partenaires potentiels ou de proies	Avertissements sonores contre des intrus (marquage de territoire) Évitement de prédateurs ou de zones hostiles par repérage acoustique
Chimiotactisme	Attraction vers des ressources ou des conspécifiques	Signaux olfactifs aversifs (prédateurs, zones hostiles)

\* Mécanisme de protection d'un animal, basé sur des signaux avertisseurs, prévenant d'éventuels prédateurs qu'il n'est pas comestible.

Différentes stratégies ont été décrites dans la littérature, déployées notamment en fonction du type de déplacement (quotidien *versus* ponctuel) :

- la navigation orientée vers une cible, utilisée notamment pour traquer une proie ou suivre un conspécifique. L'animal poursuit un but et navigue dans sa direction par la perception des indices sensoriels visuels, auditifs ou olfactifs émanant directement de cette cible ;

- la construction de « cartes mentales ». À partir d'un point zéro dans le référentiel spatial de l'animal (ex. : son nid), l'individu mémorise ses trajets, les distances parcourues et les directions prises en s'appuyant sur des indices sensoriels rencontrés, notamment visuels ou olfactifs. Cette forme de navigation serait surtout utilisée pour des trajets sans cible particulière (déplacements erratiques, en recherche d'opportunité) ou bien quand la cible est trop loin pour être directement perçue (ex. : migration longue distance des oiseaux). Les animaux seraient ainsi capables d'élaborer des cartes mentales sur des étendues plus ou moins vastes, comme un réseau d'indices sensoriels mémorisés. Ce support serait ensuite modulable (ex. : prise de

raccourcis, chemins à privilégier dans tel ou tel contexte) pour tenir compte notamment de facteurs contextuels comme les conditions météorologiques (ex. : modification des signaux sensoriels olfactifs par le vent);

– il existe aussi des comportements exploratoires, sans cible précise ni formation de carte mentale, chez des individus en recherche.

Au terme de ce deuxième chapitre, nous comprenons que la perception sensorielle est le processus qui transforme un même espace physico-chimique en un espace perçu, propre à chaque individu qui l'occupe : son paysage sensoriel résulte de différentes perceptions, notamment visuelles, sonores et olfactives. C'est au sein de ce monde ressenti que les animaux sélectionnent leurs habitats et se déplacent, en s'appuyant sur les indices sensoriels. Nos activités humaines sont connues pour modeler les paysages et modifier les milieux naturels, mais comment perturbent-elles aussi cette dimension sensorielle ?



### 3. QUELLE EST NOTRE EMPREINTE ÉCOLOGIQUE SENSORIELLE ?

Dans quel ordre aborder les pollutions sensorielles ? Dans ce chapitre, nous faisons le choix de refléter l'évolution chronologique concernant l'attention dont ont bénéficié les différentes pollutions sensorielles. Il reste difficile de retracer de manière globale cet historique, qui demanderait de considérer l'ensemble des sphères, notamment scientifique (présence dans la littérature, où il faut à nouveau différencier divers champs disciplinaires : l'écologie, la sociologie, la médecine, etc.), politique (ex. : mise à l'agenda politique, réglementation) ou sociétale (ex. : prise de conscience, prise en compte sur le terrain). Toutefois, il semblerait que la pollution lumineuse ait émergé en premier, en particulier pour ce qui est de l'écologie, il y a déjà plusieurs décennies, avec aujourd'hui un corpus de littérature très étendu. L'intérêt pour la pollution sonore est plus récent, même si le rythme de publication est aujourd'hui très soutenu. La pollution olfactive, quant à elle, reste un sujet quasiment inexploré. En outre, c'est bien de cette manière cloisonnée que ces différentes perturbations sensorielles ont d'abord été considérées (et le sont encore aujourd'hui en grande partie). La reconnaissance d'une problématique globale de pollutions sensorielles — montrant les convergences entre ces différentes perturbations — est extrêmement récente dans la littérature scientifique. C'est donc en reprenant cette chronologie que nous aborderons ce chapitre sur les impacts écologiques, en traitant d'abord les trois pollutions séparément, puis par une approche transversale et synthétique.

#### LA LUMIÈRE ARTIFICIELLE NOCTURNE

**Biologiquement diurne, socialement ubiquiste**

Les humains entretiennent un rapport paradoxal avec la nuit. Biologiquement, l'espèce humaine fait partie des animaux

diurnes. En effet, nous ne possédons pas d'adaptation particulière à l'obscurité. Au cours du cycle circadien, l'obscurité de la nuit est donc pour nous un temps indispensable de repos biologique, physiologique, psychologique. Dans le même temps, les êtres humains ont depuis longtemps cherché à prolonger la nuit leurs activités diurnes à la faveur d'une lumière artificielle. Historiquement, la domestication du feu, il y a environ 400 000 ans, fut une première étape majeure permettant de repousser les limites du jour. Pendant des millénaires, le feu restera la seule manière pour les humains de maîtriser et de coloniser la nuit (foyers, torches, réverbères à huile, puis au gaz). Puis, au début du XIX<sup>e</sup> siècle, sont apparues les premières ampoules électriques à incandescence des temps « modernes ». Depuis les années 2010, les LED (*light-emitting diodes*) sont à leur tour utilisées en éclairage extérieur, révolutionnant à nouveau notre manière d'éclairer la nuit.

En France, l'éclairage public n'a réellement fait son entrée qu'à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, imposé par la monarchie dans les principales villes du royaume (voir la thèse de Reculin, 2017). Introduit initialement pour des motifs sécuritaires, l'éclairage artificiel remplit aujourd'hui de multiples fonctions. Il est toujours utilisé pour assurer la sécurité et le confort des personnes ou des biens (ex. : voirie, stationnement, entrepôts), mais aussi pour façonner l'esthétique nocturne par la mise en valeur des bâtiments et des jardins, ou comme un levier économique (vitrines, publicités, enseignes). Finalement, il est difficile de citer une activité extérieure nocturne qui ne soit pas associée à une production de lumière artificielle (ex. : déplacement, activité sportive, chantier, événementiel, serre agricole), dans des espaces publics comme privés.

De nos jours, la lumière artificielle nocturne est devenue un phénomène planétaire. Un atlas mondial produit en 2006 montre à quel point ces lumières ont gagné tous les continents, en lien étroit avec la densité humaine et l'urbanisation (Falchi *et al.*, 2016). Ce même atlas estime qu'un tiers de l'humanité ne peut plus observer la Voie lactée, notre galaxie. Ces émissions de lumière artificielle nocturne continuent d'augmenter à l'échelle mondiale, à la fois en quantité et en surface, d'environ

2 % par an selon une estimation de 2017 (Kyba *et al.*, 2017). À l'échelle européenne, l'obscurité aurait régressé d'environ 15 %, entre 1992 et 2010, y compris dans les aires protégées (Gaston *et al.*, 2015). En effet, la lumière ne s'arrête pas aux limites tracées par les humains. Ces espaces réglementairement protégés, censés être préservés des pressions anthropiques, sont en réalité exposés aux perturbations lumineuses qui agissent à grande distance.

Le déploiement des LED accentue le problème, par effet rebond ou par amplification du phénomène de diffusion de la lumière bleue. En outre, le spectre des LED est moins visible par les satellites aujourd'hui actifs, ce qui tend à sous-estimer les chiffres de cette augmentation. Factuellement, les émissions lumineuses mondiales acquises par satellite se sont amplifiées d'au moins 49 % entre 1992 et 2017, mais des chercheurs estimaient en 2021 que la hausse réelle se situe autour de 270 % au niveau mondial, et même jusqu'à 400 % dans certaines régions (Sánchez de Miguel *et al.*, 2021) !

En France, alors que l'éclairage d'une nuit naturelle sous nos latitudes se cantonne à moins d'un lux, il n'est pas rare de mesurer dans les rues d'une ville ou sur un parking jusqu'à 100 lux et même plus. L'Observatoire national de la biodiversité met à disposition un indicateur de la pollution lumineuse diffuse<sup>9</sup>, calculé à partir des données satellites de la NASA. En 2020, 85 % du territoire métropolitain était pollué, et seules quelques poches relictuelles d'obscurité à un niveau optimal persistaient (ex. : Bretagne, Massif central, Morvan). Une mise à jour entre 2020 et 2023 montre une évolution favorable significative, ramenant la proportion du territoire hexagonal pollué à 72 %.

### Les impacts sur la biodiversité

Les écrits témoignant de dommages causés à la faune ou à la flore par la lumière artificielle nocturne sont très anciens. Dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, des épisodes de mortalités massives d'oiseaux ont été

---

9. Plus précisément, il s'agit d'une représentation de la luminance zénithale en cœur de nuit par temps clair : <https://www.tramevertcetbleue.fr/observatoire-de-la-pollution-lumineuse>

consignés. La désorientation des animaux peut en effet conduire à leur mort par collision ou épuisement au pied de tours de télécommunication ou de phares maritimes. La perte retardée des feuilles des arbres lorsqu'ils sont éclairés était aussi déjà notée dans les années 1930. Ces écrits naturalistes ne relèvent pas de protocoles de recherche, mais ils montrent que les effets de la pollution lumineuse ont très tôt été connus par certains observateurs.

Depuis les années 1980, la recherche en biologie et en écologie s'est progressivement penchée sur cette problématique, et le rythme des publications s'est très nettement accéléré ces dix à quinze dernières années. On recense aujourd'hui un corpus bibliographique de plusieurs milliers d'articles scientifiques documentant une multitude d'impacts négatifs. Il existe de très nombreuses synthèses, en anglais comme en français, qui permettront au lecteur intéressé de comprendre de manière détaillée les effets de la pollution lumineuse sur le vivant (voir par exemple Busson et Bretaud, 2020 ; Falcón *et al.*, 2020 ; Sordello, 2017b ; Svechkina *et al.*, 2020). Nous présentons ici un résumé des principaux mécanismes permettant de dépeindre l'étendue du problème aux différentes échelles de la biodiversité.

La pollution lumineuse est une menace à plusieurs visages pour la biodiversité. Elle peut prendre une forme ponctuelle ou diffuse et se matérialiser dans l'air, au sol, sur l'eau ou dans l'eau (figure 4). Une des formes facilement visible par tous est la création de halos lumineux par diffusion de la lumière dans l'atmosphère, qui conduit à des effets de masquage du ciel étoilé, repère des espèces nocturnes. Mais bien d'autres formes existent : la visibilité directe des sources lumineuses peut générer des éblouissements, la projection de lumière au sol peut créer des zones évitées par la faune, la lumière plaquée sur l'eau peut devenir polarisée et affecter la navigation des insectes, la pénétration de la lumière dans l'eau peut perturber les écosystèmes aquatiques en profondeur.

Les différents échelons de la biodiversité sont impactés par l'éclairage nocturne : l'expression des gènes, le comportement et le métabolisme des individus, la dynamique des populations, les relations entre les espèces, et donc le fonctionnement des écosystèmes, ou encore la perméabilité des paysages nocturnes.



**Figure 4.** Différentes formes de pollution lumineuse (© Romain Sordello).

- A) Halo lumineux entraînant un masquage du ciel étoilé.
- B) Lumière projetée au sol représentant des zones potentiellement infranchissables par certains animaux.
- C) Réflexion de la lumière sur l'eau et pénétration dans les masses d'eau.

La lumière artificielle modifie des paramètres très variés chez les individus, tels que la croissance, la survie, la fécondité, la mobilité, susceptibles d'avoir des conséquences à l'échelle populationnelle. Par exemple, des études de chercheurs français menées à Lyon ont montré qu'elle provoque une dérégulation des gènes du crapaud commun (*Bufo bufo*) et qu'elle diminue aussi sa fertilité (Touzot *et al.*, 2020 ; 2021). La production de mélatonine est également inhibée chez de nombreux animaux, et leur capacité à synchroniser leurs rythmes biologiques avec l'alternance jour-nuit est donc compromise. Les végétaux exposés aux éclairages sont aussi déphasés, ils perdent leurs feuilles plus tard ou ouvrent leurs bourgeons plus tôt.

Dans les écosystèmes, les interactions prédateurs-proies sont particulièrement touchées. Un phénomène bien documenté et facilement visible par tous est l'attraction des insectes vers les sources de lumière. Cette concentration a pour effet de vider les milieux naturels adjacents et de biaiser la prédation par les animaux insectivores (ex. : chauves-souris, geckos, araignées). Rappelons que les populations d'insectes s'effondrent à l'échelle mondiale du fait de l'usage massif des pesticides et de la perte d'habitat. Dans cet effondrement, la pollution lumineuse joue un rôle indéniable, bien que mal quantifié à ce jour. Les impacts de la pollution lumineuse sur les insectes ont aussi des effets néfastes sur la pollinisation des plantes à fleurs, assurée à 90 % par l'entomofaune. Une publication suisse a montré une baisse de 13 % de la production des fruits (Knop *et al.*, 2017). D'autres fonctions essentielles dans les écosystèmes sont aussi perturbées, comme le recyclage de la matière organique. Ces fonctions représentent pour nous des services gratuits que nous rend la nature (ce que l'on appelle les « services écosystémiques »). En d'autres termes, la pollution lumineuse est susceptible de représenter une menace pour nos sociétés en affectant les cycles géochimiques ou le rendement agricole.

Finalement, on retrouve globalement moins d'espèces dans les écosystèmes éclairés, parce que les espèces fuient spontanément les zones polluées ou parce que l'éclairage dégrade leurs conditions de vie. Les effets peuvent se répercuter en cascade au fil des chaînes alimentaires. Une compétition s'installe entre les



espèces : phénomène habituel avec les pressions anthropiques, les espèces les moins exigeantes, voire invasives, sont favorisées par rapport aux espèces spécialistes.

À l'échelle des paysages nocturnes, la lumière artificielle génère une perte de surface d'habitats et peut créer des barrières (ex. : ponts, routes et tissu urbain continu). Les poches d'obscurité se retrouvent alors relictuelles et déconnectées les unes des autres. Le lecteur dispose d'éléments approfondis dans l'encadré 1 concernant les effets de la pollution lumineuse sur ce plan spatial et paysager.

### ENCADRÉ 1. LES EFFETS DE LA POLLUTION LUMINEUSE SUR LE PLAN SPATIAL ET PAYSAGER

Des études scientifiques de plus en plus nombreuses montrent que la pollution lumineuse peut dégrader la qualité des habitats naturels, se traduisant par une réduction de l'occurrence d'espèces comme les lucioles et les vers luisants, les cervidés, les chauves-souris, les tortues marines en phase de reproduction. Cette désertification peut s'expliquer soit par un effet direct sur ces espèces lucifuges, soit par des effets en cascade liés aussi à l'éclairage nocturne, comme une raréfaction des ressources alimentaires, une modification de la prédation ou une augmentation de la compétition.

La lumière artificielle modifie les déplacements des animaux en matière de fréquence, d'horaires, de trajectoires, de but. Les différents types de déplacements que l'on retrouve dans un cycle biologique sont concernés. Quotidiennement, les chauves-souris lucifuges comme les rhinolophes sont surtout actives le long du côté sombre des linéaires de haies. Pour leur dispersion natale, les pumas privilégient les corridors sombres. Enfin, les oiseaux sont pénalisés pendant leur migration pendulaire, forcés de suivre des itinéraires plus longs, avec des possibilités de halte migratoire plus rares ou des risques accrus de mortalité par collision ou surprédation.

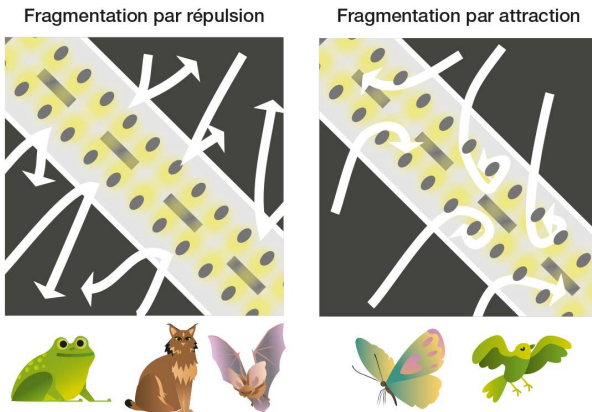
La lumière artificielle nocturne a-t-elle la faculté de fragmenter les paysages nocturnes? Visuellement, ce phénomène est intuitif en regardant une photo aérienne nocturne : les éclairages forment une infrastructure lumineuse qui clive l'obscurité et crée des zones relictuelles d'obscurité. Différentes études mettent aussi en évidence cette fragmentation à une échelle très large. Par exemple en Europe, les surfaces qui restent sombres au sein des aires de répartition des rapaces nocturnes sont de plus en plus rares et isolées.

Aujourd'hui, plusieurs travaux scientifiques confirment que ce morcellement des paysages nocturnes est problématique. .../...

.../...

Le pouvoir fragmentant de la lumière est, une fois de plus, lié au phototactisme, positif ou négatif\* (décrit au chapitre 2 ; figure 5) :

- les espèces attirées par la lumière sont piégées par les structures éclairées et ne peuvent pas les franchir. Ce phénomène a été théorisé il y a déjà vingt ans et qualifié de *vacuum effect* (« effet aspirateur »), par exemple concernant les insectes. Les populations d'invertébrés dans les milieux adjacents aux routes éclairées sont « vidangées » ;
- les espèces qui fuient la lumière éviteront les structures éclairées. Plusieurs études ont démontré que les zones lumineuses sont difficiles à traverser par certains animaux. Par exemple, une étude menée en France dans le Parc naturel régional des Causses du Quercy a mis en évidence que, selon les saisons, des passages à faune éclairés seront moins empruntés par des blaireaux ou des renards (Sordello *et al.*, 2025b).



**Figure 5.** Les deux grands mécanismes de fragmentation par la lumière artificielle nocturne (source : d'après Sordello *et al.*, 2022 ; licence CC-BY).

Les infrastructures humaines peuvent ainsi agir comme des filtres, voire comme des barrières physiques du fait de leurs éclairages : l'éclairage d'une route peut ralentir, et même stopper les crapauds qui migrent entre leur zone de reproduction et celle d'hivernage (Van Grunsven *et al.*, 2017) ; une étude expérimentale sur les anguilles montre qu'elles choisissent à 75% les corridors sombres pour se déplacer (Vowles et Kemp, 2021), ce qui suggère que les ponts éclairés sont susceptibles d'entraver la migration de ces animaux en créant des barrières lumineuses transversales aux cours d'eau.

\* Pour aller plus loin, voir Sordello (2017b).

Les impacts de l'éclairage nocturne dépendent de plusieurs paramètres de la lumière : la quantité émise par la source, la composition spectrale ou encore la durée de l'éclairage.

En ce qui concerne la quantité, la littérature montre que la faune comme la flore réagissent à des « doses » extrêmement faibles de lumière artificielle, ce qui est cohérent avec l'influence déjà provoquée par le cycle lunaire évoquée précédemment. Le tableau 3 présente quelques exemples.

**Tableau 3.** Exemples de seuils de sensibilité pour différents taxons et phénomènes biologiques.

Phénomène biologique	Seuil de sensibilité (lux)
Hypertrophie cardiaque chez les oiseaux	1,5
Modification du comportement de nage des poissons	0,5
Croissance accélérée chez les plantes	0,3
Digestion réduite chez les oisillons	0,3
Locomotion plus faible des crapauds	0,04
Levée de la diapause des insectes (diptères)	0,01

Concernant la composition spectrale, chaque couleur va activer ou inhiber certaines fonctions biologiques chez tel ou tel taxon (Sordello, 2017a). Par exemple, c'est principalement le bleu qui régule l'horloge biologique chez les animaux *via* l'inhibition de la mélatonine, alors que c'est plutôt le rouge qui régule celle des plantes. Entre autres, le bleu a un fort pouvoir attractif sur les insectes ou les oiseaux en migration, le vert inhibe le déplacement des crapauds et favorise la prolifération d'algues. Globalement, il semblerait que les couleurs jaune-orange soient les moins impactantes en l'état des connaissances, voire le rouge pour certains taxons. Par exemple, une étude a montré que les chauves-souris fuyaient plus des haies éclairées par une lumière verte ou blanche, et moins par l'orange ou le rouge (Zeale *et al.*, 2018).

Enfin, certaines espèces sont sensibles à la durée d'éclairage. Des nuances de quelques minutes d'éclairage peuvent avoir des effets très différents. Une équipe aux Pays-Bas a montré qu'un éclairage de 15 min avait peu d'effet sur la bioluminescence

des femelles de vers luisants, alors qu'un éclairage de 90 min aboutissait à l'extinction durable de quasiment toutes les femelles (Elgert *et al.*, 2021).

## LES SONS ANTHROPIQUES

### Anthropophonie

Comme les autres espèces animales, l'espèce humaine émet ses propres sons dans l'environnement (ex. : parole, cri, chant, applaudissement, marche) et participe ainsi à la biophonie. Néanmoins, c'est incontestablement sa capacité à imaginer et à créer des outils qui a marqué un tournant dans son histoire. Dans cette expansion sonore, on pourrait citer la construction d'instruments de musique, dont les plus vieux datent d'au moins 35 000 ans. Toutefois, la modification des paysages sonores a clairement basculé avec l'apparition des machines (ex. : voitures, trains, bateaux, usines, tracteurs) grâce à la maîtrise des énergies fossiles et de l'électricité.

Aujourd'hui, les conséquences des activités humaines sur les paysages sonores sont énormes. Non seulement les activités humaines produisent du bruit, mais toutes les pressions anthropiques modifient aussi les écosystèmes, et donc la biophonie. Les deux mécanismes conduisent à une dégradation, voire à une disparition des paysages sonores naturels. D'après le musicien Bernie Krause, qui a beaucoup étudié les paysages sonores de la planète, sur 15 000 paysages sonores naturels qu'il a enregistrés en plus d'un demi-siècle (depuis 1960), la moitié n'existerait plus aujourd'hui.

L'empreinte sonore des sociétés humaines est très étendue, constituée de sons continus ou intermittents, et dans toute la gamme de fréquences, des ultrasons aux infrasons. Cette composante d'origine anthropique dans les paysages sonores est appelée « anthropophonie » (ou « technophonie » si on y inclut le bruit des machines), par analogie avec la géophonie et à la biophonie abordées précédemment.

La plupart de nos activités produisent des sons : transports routiers, maritimes ou aériens, activités industrielles (ex. : forage,

minage, éoliennes) et agricoles, activités militaires (aériennes, terrestres, maritimes) ou encore activités récréatives (ex. : concerts, fréquentation des milieux naturels, observation des baleines). Les niveaux sonores émis vont de quelques décibels à plus de 100 dB. Dans certains cas, cette émission sonore est recherchée (ex. : concert). Cependant, contrairement à la lumière artificielle, qui répond initialement à un besoin pour les humains, la plupart du temps ces sons d'origine anthropique sont des effets collatéraux qui ne servent pas à l'activité. Ils sont donc indésirables pour l'être humain lui-même (ex. : bruit d'un moteur, d'une éolienne, d'un chantier).

Comme pour la lumière artificielle, les sons anthropiques se propagent dans l'environnement et, s'ils ne rencontrent pas d'obstacles (ex. : topographie, végétation), ils peuvent atteindre là aussi des espaces sans activité et même des espaces dits « protégés ». Par exemple, une modélisation effectuée aux États-Unis a fait ressortir que les bruits anthropiques ont doublé le niveau sonore dans 63 % des aires protégées par rapport au paysage sonore naturel, et même augmenté d'un facteur 10 ou plus dans 21 % d'entre elles (Buxton *et al.*, 2017).

### Les impacts sur la biodiversité

À l'instar de la pollution lumineuse, la pollution sonore fait l'objet de très nombreuses recherches en écologie depuis quelques années. Un recensement exhaustif de la littérature a abouti à 1 800 publications cataloguées en 2020.

Là encore, de nombreuses synthèses existent, récapitulant en anglais ou en français les impacts négatifs des émissions sonores anthropiques sur la faune et les écosystèmes, que le lecteur pourra consulter pour une compréhension approfondie du phénomène (voir par exemple BruitParif, 2020 ; Brumm, 2013 ; Slabbekoorn *et al.*, 2018). Pour résumer, on constate une grande diversité de taxons affectés — tous les vertébrés, de même que les insectes, les mollusques, les crustacés — dans les milieux terrestres, aquatiques, marins et côtiers. Les effets sont très divers sur les individus — à la fois d'ordre physiologique et comportemental — et jusqu'à l'échelle des populations, des communautés, des paysages (figure 6). Contrairement aux yeux

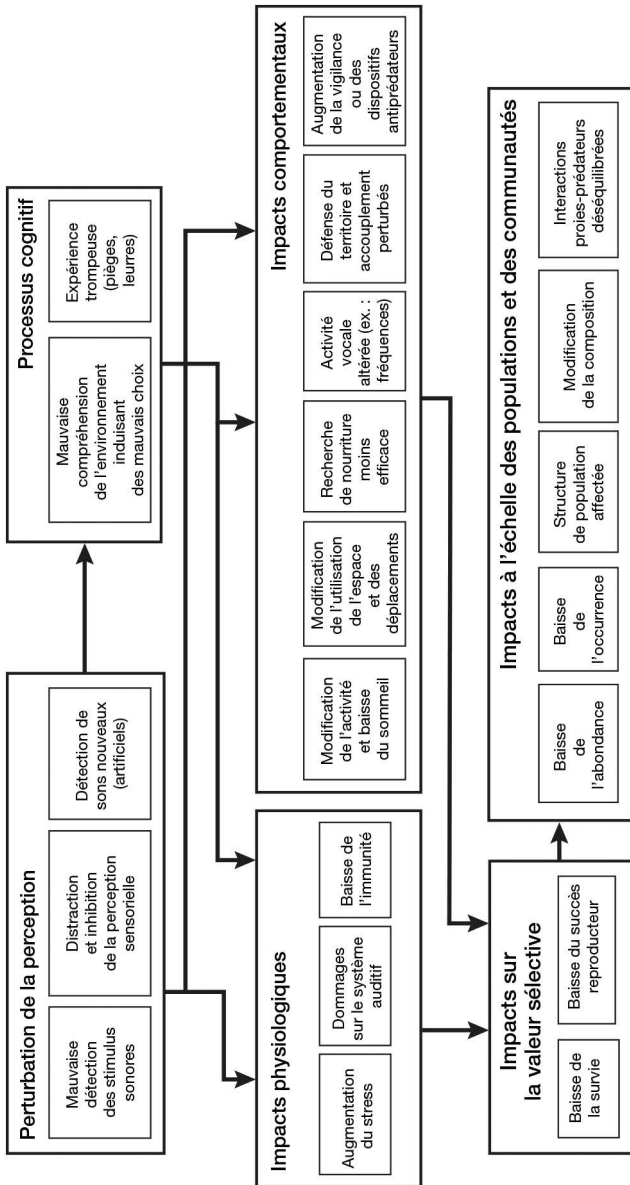


Figure 6. Cascade d'impacts du bruit anthropique sur la faune à l'échelle individuelle et leurs implications aux échelles populationnelle et écosystémique (source : Sordello, 2024, d'après Francis et Barber, 2013).

chez la plupart des animaux (paupières), les récepteurs auditifs ne possèdent généralement pas de mécanisme de fermeture. Les êtres vivants subissent donc le bruit. Des réponses comportementales sont alors mises en place, telles qu'une vigilance permanente et si possible la fuite.

Un phénomène très étudié concerne l'impact des sons anthropiques sur la communication acoustique des animaux. Comme expliqué au chapitre 1, les animaux échangent des informations entre eux par le biais de signaux sonores — chants, cris et diverses manifestations acoustiques — entre conspécifiques (ex. : partenaires, parents-descendants) ou entre individus d'espèces différentes. Les bruits ont alors un effet de masquage, rendant inaudibles ces sons naturels.

Les sons anthropiques peuvent altérer directement le système auditif des animaux, parfois de manière irréversible. Ils engendrent également pléthore d'impacts biologiques et physiologiques (ex. : stress, dérèglement des horloges internes et du métabolisme). Les interactions proies-prédateurs sont brouillées : les proies n'entendront pas s'approcher leurs prédateurs et, inversement, les prédateurs détecteront mal leurs proies. Par exemple, des expériences menées aux États-Unis ont montré que des chouettes localisent moins bien leurs proies en présence de bruits industriels (Mason *et al.*, 2016) (encadré 2).

La reproduction et la survie des individus sont réduites, ce qui freine la dynamique des populations. Par exemple, une équipe française du Centre national de la recherche scientifique (CNRS) a montré que des crapauds exposés au bruit routier vocalisent moins, ce qui pourrait engendrer des conséquences sur la reproduction, comme une baisse de la probabilité de détection de certains mâles, ou une concentration des fécondations chez les mâles les plus audibles (Lengagne, 2008). Les bruits ont ainsi la capacité de constituer une barrière acoustique dans le paysage. Finalement, plusieurs études suggèrent une corrélation négative entre le bruit et la richesse des communautés ou l'abondance des espèces, notamment chez les oiseaux (Matthew *et al.*, 2024).

Le fait qu'un son anthropique devient du bruit, autrement dit cause des problèmes, dépend des espèces (capacité auditive),

voire des individus (variabilité intraspécifique), ainsi que du type d'impact considéré (ex. : perturbations, évitement, dommages physiques). Cela dépend aussi de l'émission elle-même (amplitude, durée, fréquence du stimulus sonore). Les sons anthropiques présentent une grande variabilité temporelle et spatiale et une grande diversité d'amplitude, de fréquence, de durée, ce qui génère un fort potentiel d'impacts.

## ENCADRÉ 2. EFFETS SUR LES RAPACES NOCTURNES

Une revue de littérature a collecté les études scientifiques disponibles dans le monde sur les effets du bruit sur les chouettes et les hiboux. Le résultat souligne que, pour le moment, la connaissance reste sommaire. Néanmoins, les 28 études recueillies suggèrent que le bruit génère tout un ensemble d'effets négatifs sur les rapaces nocturnes :

- les travaux mettent en évidence que les chouettes chantent moins lorsqu'il y a du bruit. Peut-être parce que la communication acoustique passe mal dans un environnement bruyant? Le fait est que les vocalisations sont impliquées dans la formation des couples. Cette situation a donc des répercussions probables sur la reproduction des chouettes. Certaines études confirment justement que le nombre de nids ou de jeunes est plus faible dans les zones bruyantes;

- l'ouïe est aussi utilisée par les chouettes pour détecter leurs proies. Des études tendent à montrer que le bruit réduit la probabilité qu'une chouette capture une proie. Le bruit a donc une incidence sur la capacité des chouettes à s'alimenter, et donc potentiellement sur leur santé, voire leur survie;

- le bruit stresse les organismes, comme en témoignent les études physiologiques dosant des marqueurs sanguins. Le stress est un phénomène normal permettant aux animaux de réagir à un environnement hostile. En revanche, le bruit chronique est susceptible d'engendrer un stress permanent néfaste à la santé des individus, par exemple une moins bonne résistance aux infections. Le stress des chouettes se voit également sur le plan comportemental, par des micromouvements corporels parasites ou tout simplement par l'envol de l'oiseau cherchant à s'éloigner de la source du bruit.

Une corrélation négative apparaît ainsi dans les études entre le niveau de bruit et l'abondance des chouettes. Rappelons qu'une corrélation n'est pas un lien de causalité et que le bruit est souvent conjoint à d'autres facteurs de pressions (ex. : dérangement, urbanisation). Néanmoins, un tableau d'impacts se dessine, très cohérent avec ce qui est connu pour d'autres espèces.

## LES ODEURS ANTHROPIQUES

### Phénomène et quantification

Deux grands mécanismes perturbent le fonctionnement des paysages olfactifs (figure 7).

Tout d'abord, comme nous l'avons vu au chapitre 2, la végétation et les micro-organismes du sol jouent un rôle fondateur dans les paysages odorants. Or les pressions anthropiques appauvrissent les sols et affectent les communautés végétales (diminution de la richesse floristique, perte de surface), ce qui réduit mécaniquement l'émission de molécules volatiles naturelles et donc appauvrit les paysages odorants.

Par ailleurs, les activités et les infrastructures humaines, telles que l'agriculture, l'industrie, les transports ou encore les réseaux d'assainissement, libèrent de nombreux composés volatils dans l'environnement que l'on peut qualifier de « pollution olfactive ». Entre autres, d'après Renou *et al.* (2021), les transports, les industries chimiques, les raffineries et la combustion d'énergies fossiles rejettent des quantités importantes d'oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) ou de dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) dans l'atmosphère. Ces gaz contribuent à la formation par photolyse de dérivés réactifs de l'oxygène (appelés « ROS », pour *reactive oxygen species*) comme l'ozone ( $\text{O}_3$ ), les radicaux nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) ou hydroxyle (OH). Notons aussi que de nombreuses substances anthropiques peuvent se retrouver dans l'eau (ex. : hydrocarbures, pesticides, métaux lourds, lessives), devenant des perturbateurs potentiels de la communication olfactive aquatique, mais nous nous focalisons ici sur les molécules odorantes volatiles.

Quantifier et cartographier cette pollution olfactive est bien plus difficile que pour la lumière artificielle ou le bruit anthropique, et ce pour plusieurs raisons. D'une part, on ne connaît pas l'ensemble des facultés olfactives dans le vivant (récepteurs olfactifs) et donc l'ensemble des molécules odorantes. D'autre part, sur la base des molécules odorantes connues, il ne semble pas se dégager de typologie claire permettant de prédire leur caractère odorant (comme souligné au chapitre 1, deux molécules proches peuvent être odorantes ou non pour une espèce

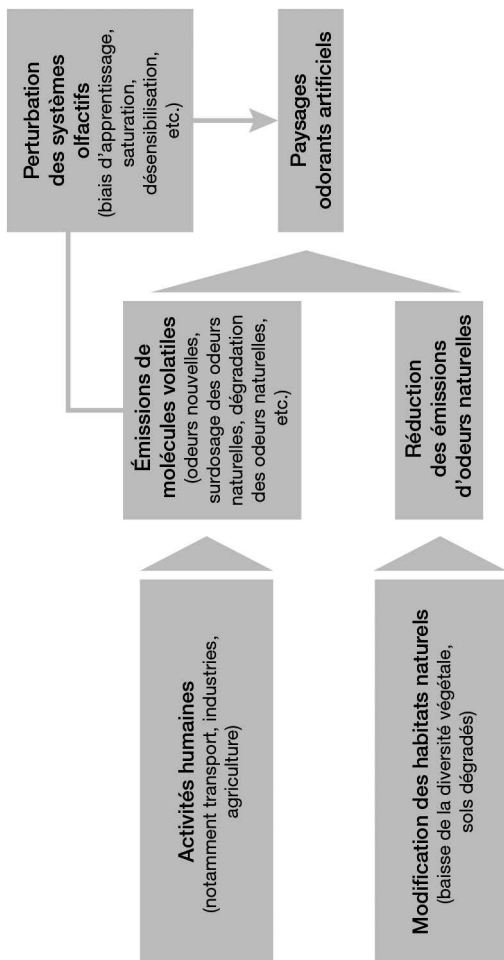


Figure 7. Les mécanismes de dégradation des paysages olfactifs.



donnée), même si certaines grandes familles ou fonctions biochimiques sont connues (aromatiques, phénols, etc.). Enfin, il reste plus coûteux et complexe de décrire et quantifier la composition moléculaire de l'air (mesure chimique) que de mesurer des émissions spectrales visuelles ou acoustiques (mesure physique).

Toutefois, un suivi des nuisances olfactives vis-à-vis des humains est déjà mis en œuvre dans certains territoires par les associations fédérées par Atmo France (Fédération des associations agréées de surveillance de la qualité de l'air) — l'observatoire des odeurs —, par exemple en Nouvelle-Aquitaine<sup>10</sup>. Ce suivi mobilise la perception olfactive particulièrement fine chez certaines personnes : riverains, employés de sites industriels, agents de collectivités, etc. Certains industriels développent aussi ce genre de suivi, par exemple concernant les réseaux d'assainissement. Ces infrastructures rejettent des composés soufrés ( $H_2S$ ) et des COV issus de la dégradation des résidus organiques qui se traduisent par de fortes odeurs. Le groupe Suez a ainsi mis en place le programme Nose City, qui propose aux collectivités un suivi de ces composés sur les infrastructures (stations d'épuration, avaloirs, postes de relevage, regards de décharge).

### Les impacts sur la biodiversité

Contrairement à la lumière artificielle et au bruit, il existe encore très peu de littérature sur l'effet des odeurs anthropiques. De plus, à ce jour, la perturbation de la perception olfactive par des molécules anthropiques a surtout été étudiée dans les écosystèmes aquatiques, en considérant poissons, crustacés, mollusques ou amphibiens. Les conséquences mises en évidence concernent la détection des prédateurs, des ressources, des proies ou des hôtes ainsi que la communication intraspécifique (Lurling et Scheffer, 2007).

En ce qui concerne les écosystèmes terrestres, les recherches visant des molécules volatiles sont rares et ont surtout concerné les insectes (Renou et Anton, 2020). Nous observons cependant un nombre croissant d'articles sur le sujet ces dernières

---

10. <https://www.atmo-nouvelleaquitaine.org/>

années, ce qui montre un intérêt grandissant dans la communauté scientifique. Une synthèse des connaissances disponibles a été publiée en français (Renou *et al.*, 2021), et ce qui suit en présente un résumé pour décrire les grands principes et fournir au lecteur quelques exemples.

Les études existantes décrivent notamment une perturbation dans la détection des ressources florales par les insectes. Des chercheurs ont ainsi mis en évidence que des odeurs d'hydrocarbures freinaient la détection des fleurs par des bourdons (Girling *et al.*, 2013); de même pour des émanations issues de fongicides (David *et al.*, 2022). Par ailleurs, la communication phéromonale entre mâles et femelles est brouillée. Une équipe allemande a montré que des drosophiles (mouches) mâles étaient moins reconnaissables par les femelles dans un environnement riche en ozone, limitant ainsi la reproduction (Jiang *et al.*, 2023).

Malgré les connaissances limitées, une gamme très large de taxons au sein des écosystèmes terrestres pourrait être affectée, compte tenu de la place étendue de l'odorat dans le règne animal. En outre, les dommages identifiés sur les organismes aquatiques sont potentiellement transposables aux organismes terrestres. Enfin, les connaissances disponibles permettent déjà d'identifier plusieurs mécanismes sous-jacents par lesquels les molécules volatiles d'origine anthropique agissent.

Une première voie est la diffusion dans l'environnement de molécules « nouvelles », qui n'existent pas à l'état naturel, et qui sont susceptibles d'être détectées comme des odeurs par les organismes. Les activités humaines génèrent ainsi au sens propre des « odeurs artificielles ».

Une deuxième voie est la production par les activités humaines d'odeurs naturellement émises par les organismes vivants, mais libérées en telles quantités qu'elles deviennent problématiques. Rappelons que la détection d'une odeur dépend directement de la concentration de la substance et du seuil de détectabilité propre à chaque organisme (étape de la sommation dans la perception sensorielle, voir chapitre 1). On peut alors suspecter que des rejets artificiels deviennent détectables alors que les mêmes émanations naturelles ne l'étaient pas. À l'inverse, des rejets artificiels pourraient provoquer une saturation des

récepteurs olfactifs ou créer une habitude à la molécule odorante ; dans ces deux cas, cela entraîne un effet de masquage de l'odeur naturelle qui deviendra une non-information pour l'organisme (le signal sera bien détecté mais ignoré au stade de l'intégration). Une étude a montré par exemple que l'ozone diminuait la perception olfactive impliquée dans la détection florale chez des abeilles (Dötterl *et al.*, 2016).

Enfin, les molécules volatiles d'origine anthropique peuvent également agir, sans être directement des signaux odorants, par deux autres voies :

– d'une part, ces molécules peuvent dégrader les molécules odorantes naturelles avant qu'elles ne soient perçues par les organismes, modifier leur durée de vie ou leur configuration moléculaire, les rendant alors moins détectables par les récepteurs olfactifs. Des chercheurs français ont ainsi mis en évidence que les émissions d'ozone pouvaient réduire la durée de vie des composés volatils émis par les plantes et, ce faisant, diminuer leur détection par les insectes pollinisateurs (Vanderplanck *et al.*, 2021) ;

– d'autre part, ces molécules pourraient potentiellement perturber les systèmes olfactifs, par exemple en conduisant à une altération des récepteurs olfactifs aux molécules naturelles.

Les résultats d'une étude suggèrent que les molécules anthropiques puissent parasiter la « signature olfactive » propre à chaque individu. Cette signature olfactive est en effet ce qui permet aux individus de se reconnaître, notamment au sein d'une colonie. Dans cette étude, les auteurs ont observé que des chauves-souris s'affaieraient à une toilette plus fréquente en présence d'odeurs humaines (Liang *et al.*, 2019).

## LES POLLUTIONS SENSORIELLES : UNE PRÉOCCUPATION NOUVELLE, UNE RESPONSABILITÉ COLLECTIVE

Une famille de polluants aux nombreux points communs nouvellement identifiée

Depuis quelques années, les pollutions lumineuses d'un côté et les pollutions sonores de l'autre sont devenues l'objet de recherches actives en biologie et en écologie (ainsi qu'en médecine).

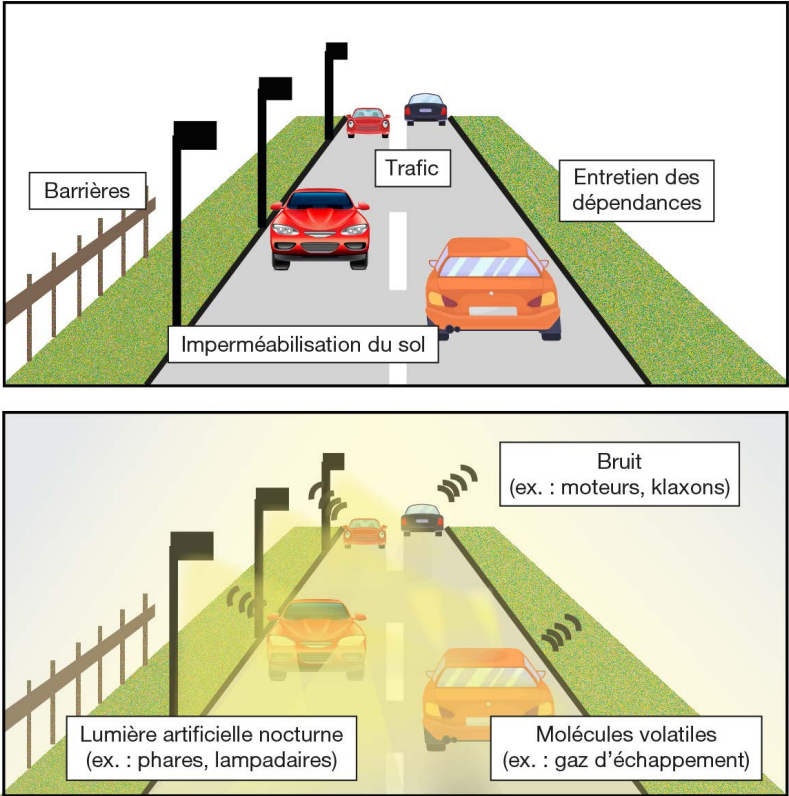
Toutefois, ce n'est que récemment que ces pollutions ont été regroupées sous la bannière commune de «pollutions sensorielles». Désormais, cette famille particulière de polluants est clairement identifiée dans la littérature scientifique, rendue visible notamment par des chercheurs aux Pays-Bas et en Écosse (Halfwerk et Slabbekoorn, 2015). On y regroupe les pollutions qui agissent en interférant avec la perception sensorielle, par exemple la vision, l'ouïe et l'odorat. Il ne s'agit donc pas de pollution que l'on respire (même si l'odorat passe par le nez chez certains organismes), que l'on ingère ou que l'on étale sur notre peau. La nature de ces polluants leur confère de nombreux points communs concernant leur comportement dans les milieux ou les impacts qu'ils génèrent. En outre, dans un paysage, les éléments anthropiques qui émettent ces stimulus sensoriels sont souvent les mêmes. Par exemple, une route produit à la fois de la lumière artificielle nocturne (éclairages de la voirie, phares des voitures), des sons liés à son trafic et des molécules olfactives (hydrocarbures notamment) (figure 8).

#### Des pollutions réversibles

Du fait de leur nature ondulatoire ou volatile, ces polluants sont sans rémanence, contrairement aux pollutions matérielles (ex. : plastiques) ou chimiques (ex. : pesticides, métaux lourds, hydrocarbures). Ils sont donc réversibles, ce qui est un fort avantage.

Si les pollutions sensorielles en tant que telles sont réversibles, leurs effets sur le vivant ne le sont pas forcément. Des espèces reviendront-elles si tout à coup l'éclairage nocturne d'une commune est réduit ou coupé? La littérature scientifique reste très lacunaire à ce sujet, même si des retours d'expérience sont encourageants (voir chapitre 4 sur les solutions). Des études menées sur les chauves-souris en France montrent une forme d'inertie, malgré l'arrêt de la perturbation (dans le Parc naturel régional du Gâtinais), et d'autres relatent une résilience particulièrement rapide (dans l'arrière-pays niçois). À ce jour, nous manquons fortement d'évaluations scientifiques sur les effets biologiques d'une meilleure gestion (réduction, voire suppression) des pollutions sensorielles. Toutefois, l'actualité nous invite à être confiants. Lors des confinements liés à la pandémie

du Covid-19, de nombreux animaux sauvages ont en effet été observés en ville, et chacun a pu constater que le fond sonore silencieux, lié à l'arrêt des activités humaines, a rapidement été réinvesti par les oiseaux notamment.



**Figure 8.** Une route a une empreinte multidimensionnelle dans le paysage, à la fois physique (A) et sensorielle (B) (source : Sordello *et al.*, 2025a; licence CC-BY).

Une route combine des menaces à la fois physiques — comme l'imperméabilisation du sol, la présence de clôtures, une végétation des accotements dont la gestion est plus ou moins intensive — et sensorielles — comme la lumière artificielle la nuit, le bruit du trafic et les odeurs d'hydrocarbures. Ces polluants sensoriels élargissent considérablement l'empreinte écologique de la route.

### Une action à distance

Le revers de la médaille de cette nature ondulatoire ou volatile est que ces pollutions agissent toutes à distance des sources. On peut dire qu'elles se déplacent — même si pour l'onde sonore il n'y a pas de transport de matière, car la perturbation se déplace de proche en proche.

En conséquence, ces pollutions sont susceptibles d'impacter des écosystèmes à plusieurs dizaines, voire centaines de mètres. Par exemple, il a été démontré que les lampadaires repoussent les chauves-souris jusqu'à 50 m et que le bruit d'une route diminue la densité d'oiseaux jusqu'à 100 m du tracé. Cette prise de conscience modifie totalement le regard que nous portons sur les éléments anthropiques du paysage, à l'instar d'une route (figure 8).

Cet aspect se répercute à très large échelle, comme nous l'avons vu précédemment : des zonages administrativement protégés des pressions humaines se retrouvent impactés par les pollutions sensorielles. En d'autres termes, des territoires sans point lumineux peuvent souffrir de pollution lumineuse !

### Tactisme, positif ou négatif

Le phénomène de tactisme (photo, sono, chimio) se vérifie pour les trois types de stimulus anthropiques — lumineux, sonores, olfactifs — comme pour les stimulus naturels décrits au chapitre 2. Il peut engendrer :

- une attraction (tactisme positif) à l'origine de pièges, de sources d'erreurs, de perte d'énergie, voire de mortalité par collision ;
- une répulsion (tactisme négatif), qui perturbe par exemple la navigation ou l'occupation de l'espace.

La trilogie : masquage, distraction, tromperie

Il existe des points de convergence dans les types d'effets des trois pollutions sensorielles :

- effet de masquage. Les stimulus artificiels masquent les stimulus naturels. Ce masquage peut concerner des stimulus naturels aversifs — auquel cas l'individu ne pourra pas ou mal anticiper la présence de prédateurs ou de compétiteurs, mettant sa vie en danger. Il peut aussi concerner des stimulus attractifs — auquel cas l'individu ne détectera pas ou mal les habitats



favorables, passera à côté d'opportunités (ressources, partenaires) ou manquera de repères dans sa navigation (déviation, perte de temps). Par modélisation, des chercheurs ont montré que la proportion de ressources manquées par un animal dans son paysage augmente avec le volume sonore du trafic routier, et que cet effet de masquage s'étend à plus de 1 km de l'infrastructure, même pour des trafics modérés ;

– effet de distraction. Les stimulus artificiels induisent un stress chez les animaux en les maintenant dans une forme de vigilance permanente ;

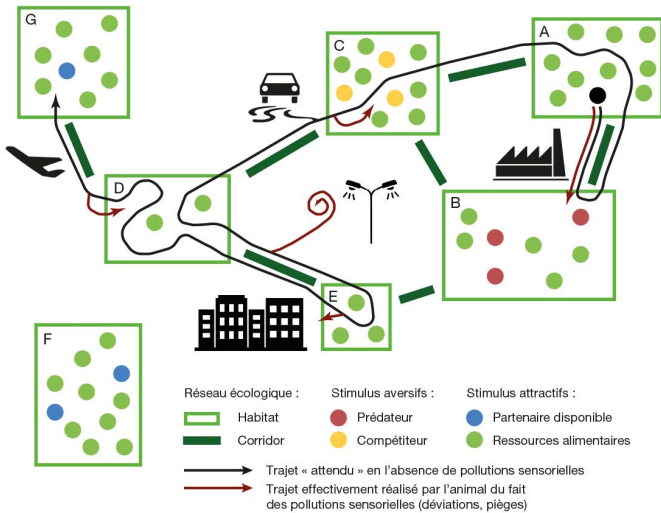
– effet de tromperie. Les stimulus artificiels peuvent constituer des leurres dans les déplacements des animaux ou dans l'identification de proies ou de partenaires, attirant ainsi les animaux dans des pièges parfois mortels.

#### Interactions possibles

En agissant par ce vecteur commun qu'est la perception sensorielle, la lumière artificielle nocturne, les sons et les odeurs anthropiques peuvent potentiellement interagir entre eux. De plus en plus d'études scientifiques considèrent ainsi l'impact que peut avoir l'exposition simultanée à différentes pressions sensorielles (en particulier la lumière artificielle et les sons anthropiques). Dans la gamme des interactions possibles, deux pollutions peuvent notamment agir en synergie — auquel cas l'effet des deux pollutions est plus important que lorsque les pollutions sont isolées — ou, à l'inverse, par antagonisme — l'effet des deux pollutions est moins fort. Par exemple, des mésanges en ville sont plus actives la nuit lorsqu'elles sont exposées à la fois à la lumière artificielle et au bruit plutôt qu'à une seule de ces pollutions (Dominoni *et al.*, 2020). Autre exemple, le bruit et la lumière artificielle d'une route perturbent le comportement vocal et spatial des oiseaux sauvages à plus grande distance du tracé lorsque les deux polluants sont combinés (Hennigar *et al.*, 2019). Comme nous l'avons vu, les différents polluants sensoriels sont très généralement émis par des sources identiques. Il est donc très fréquent que les organismes soient exposés en même temps à plusieurs d'entre eux. Ainsi, davantage d'études devraient être menées pour mieux comprendre leurs interactions.

## ENCADRÉ 3. DANS LA PEAU D'UN ANIMAL

Mettons-nous à la place d'un animal en quête d'un habitat favorable et d'un partenaire (figure 9). L'habitat A dans lequel l'individu se trouve n'héberge aucun partenaire disponible. L'animal va alors déambuler dans le paysage, au gré des informations qu'il va tirer de son environnement, pour trouver un habitat plus adapté (ex. : signature olfactive de la végétation, présence de compétiteurs ou de prédateurs, absence de ressource alimentaire détectée en dépit d'une surface d'habitat favorable). Pour ce faire, il va s'appuyer sur la multitude de stimulus sensoriels naturels (ex. : marquage territorial de compétiteurs, traces trahissant la présence de prédateurs) — qu'il va éviter — et attractifs (ex. : odeurs de ressources florales, chants de partenaires disponibles) — correspondant à ce qu'il recherche. Mais ce paysage anthropisé inclut également tout un ensemble de stimulus artificiels, « parasites », qui vont brouiller sa perception sensorielle. Par leur effet répulsif ou attractif, ils vont masquer les stimulus naturels, créer des leurres ou attirer l'animal dans des pièges.



**Figure 9.** Un paysage anthropisé constitué d'une multitude de signaux sensoriels, naturels et artificiels (source : Sordello, 2024).

Par exemple, l'animal ne pourra pas ou mal anticiper la présence de prédateurs dans l'habitat B, ou de compétiteurs dans l'habitat C,

.../...



.../...

mettant ainsi sa vie en danger. Il aura du mal à évaluer le faible intérêt des habitats D ou E et, à l'inverse, il ne détectera pas ou mal le caractère qualitatif des habitats F ou G (ex. : concrètement, l'insecte ne recevra pas les molécules odorantes des fleurs, ou l'oiseau femelle n'entendra pas le chant de l'oiseau mâle censé l'attirer). L'animal sera aussi potentiellement attiré en dehors des milieux naturels, dans des endroits non propices du paysage, où il sera définitivement bloqué (ex. : factuellement, un papillon de nuit sera « aspiré » par les lumières de la ville et s'éloignera irrésistiblement de sa prairie).

Cet exemple souligne qu'une lecture « classique » de ce paysage, qui se limiterait à regarder la composition et la configuration des éléments physiques, tels que la surface des habitats et les connexions éventuelles entre eux, serait insuffisante. La dimension sensorielle, à la fois naturelle et artificielle, apporte des informations supplémentaires pour comprendre le fonctionnement d'un paysage.

## Les pollutions sensorielles à l'épreuve des autres facteurs anthropiques

Nuisance ou pollution ?

Un premier débat terminologique s'impose : faut-il parler de nuisance ou de pollution ? Dans la littérature scientifique en écologie (et donc en anglais), les termes de *light pollution* ou de *noise pollution*, et désormais de *sensory pollutants*, sont les plus utilisés, même si le mot *disturbance* est parfois employé. Dans notre langue, le terme de « nuisance » est moins fort et fait généralement plutôt référence à une gêne créant un inconfort. Le terme de « pollution » souligne une dangerosité plus importante, voire mortelle, il est associé à une toxicité. Par exemple, *Le Robert* définit l'acte de polluer comme le fait de dégrader l'environnement, de le rendre malsain ou dangereux, alors qu'une nuisance est définie comme un ensemble de facteurs qui nuisent à la qualité de la vie. Comme nous l'avons souligné en introduction, la définition de « pollution » donnée par l'*Encyclopædia Universalis* est très inclusive et légitime donc ce terme pour les pollutions sensorielles.

Ce débat n'est pas neutre, car le terme de « pollution » renvoie à un principe juridique, à travers le mécanisme « pollueur = payeur » régi par l'article L. 110-1 du Code de l'environnement,

qui indique que « les frais résultant des mesures de prévention, de réduction de la pollution et de lutte contre celle-ci sont supportés par le pollueur ». Notons que le Code de l'environnement utilise majoritairement le terme de « nuisances lumineuses ».

Le fait est que la lumière artificielle conduit à la mortalité de certains animaux, par exemple les oiseaux, les insectes, les tortues marines. Dans de tels cas, le terme de « nuisance » est par définition inadéquat. C'est pourquoi dans cet ouvrage nous privilégions l'expression « pollution sensorielle », plus adaptée aux impacts écologiques décrits.

Ceci étant, il existe effectivement un éventail très large des niveaux d'impacts : cela peut aller d'effets temporaires et réversibles jusqu'à des effets rédhibitoires, comme la mortalité ou la baisse de fécondité. Cette palette dépend des espèces, et même des individus, ainsi que des situations (ex. : configuration, moment, caractéristiques de la pollution).

Une menace existentielle pour le vivant ?

À l'échelle de la biodiversité, quel niveau de menace les pollutions sensorielles représentent-elles parmi les différentes pressions anthropiques ? Cette question reste ouverte. Il est difficile d'y répondre, car il existe très peu d'études globales et multifactorielles permettant de hiérarchiser les menaces. Comme expliqué dès l'introduction de cet ouvrage, les pollutions sensorielles ne sont précisément pas comptabilisées dans les évaluations de l'IPBES.

Toutefois, des chercheurs du Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) ont comparé en 2016 l'effet de l'imperméabilisation des sols, de l'agriculture intensive et de la lumière artificielle sur la répartition hexagonale des chauves-souris. Ils ont alors mis en évidence que la pollution lumineuse constituait la deuxième menace pour ces animaux, plus préjudiciable que l'imperméabilisation des surfaces. Autrement dit, l'éclairage nocturne contraint davantage la répartition des chauves-souris en France que le béton ! Ce résultat surprenant à première vue peut s'expliquer par l'effet à distance des pollutions sensorielles, dont l'emprise dépasse donc la perte nette d'habitats naturels. Ce résultat, qui mériterait d'être complété par des évaluations sur d'autres taxons,

montre que les pollutions sensorielles sont susceptibles de peser fortement dans l'effondrement de la biodiversité. La question est également régulièrement posée concernant les insectes, dont le déclin massif est observé partout dans le monde. Des discussions mettent parfois en compétition les pesticides et la pollution lumineuse, mais le débat paraît stérile, car toutes les menaces doivent être résorbées. Certaines publications mettent en évidence des effondrements de populations d'insectes volants dans des zones pourtant protégées des activités anthropiques (ex. : baisse de 75 à 80 % de la biomasse d'insectes volants dans des zones protégées en Allemagne entre 1989 et 2016). Sans attribuer directement ces déclinés aux pollutions sensorielles, ce type d'étude soulève en tout cas la question de leur rôle potentiel dans des dynamiques de perte massive de biodiversité, encore mal comprises aujourd'hui, à l'intérieur de zones qui semblent pourtant à l'abri des activités humaines (telles que l'usage de biocides).

Autour de cette question liée à la gravité des pollutions sensorielles, un autre paramètre est à prendre en compte : les espèces peuvent-elles s'adapter ? La vie est certes en permanente évolution, mais offre-t-elle des possibilités suffisantes pour surmonter la perturbation des paysages sensoriels ? Voici une autre question très partiellement documentée (encadré 4).

### Tous émetteurs, tous récepteurs

Nous sommes tous concernés par les pollutions sensorielles, à la fois comme émetteurs et comme récepteurs.

#### Des sources privées et publiques

Les signaux sensoriels artificiels émanent de structures publiques comme privées, bien sûr dans des proportions diverses, mais ces proportions restent difficiles à quantifier.

Prenons l'exemple des éclairages : ils appartiennent aux collectivités, aux entreprises, aux commerces, aux particuliers. En France, on ne compterait pas moins de 11 millions de points lumineux publics. Mais combien d'enseignes publicitaires et de vitrines ? Et combien de lumières dans nos jardins domestiques ou sur nos maisons ?

#### ENCADRÉ 4. LA BIODIVERSITÉ PEUT-ELLE S'ADAPTER AUX POLLUTIONS SENSORIELLES?

Dans cet environnement planétaire devenu globalement pollué, les animaux peuvent-ils s'adapter? Diverses adaptations comportementales sont déjà connues. Un exemple typique est la modification de la communication acoustique en réponse à la pollution sonore. Certains animaux, notamment les oiseaux, montrent une capacité à chanter plus fort, à changer la fréquence de leur chant ou à modifier le moment de la vocalisation pour s'adapter à un fond sonore bruyant. C'est ce que l'on appelle l'«effet Lombard», également connu chez l'humain. Mais cette adaptation n'est pas constatée chez tous les taxons, notamment pas chez les amphibiens, comme l'a révélé une méta-analyse (Roca *et al.*, 2016). En outre, elle ne supprime pas les impacts pour autant. Si vous parvenez à vous faire entendre dans une rue bruyante en parlant plus fort, votre corps subit quand même le bruit du trafic.

Au-delà de ces adaptations comportementales, peut-on imaginer une évolution au sens biologique du terme? Certains travaux montrent que des phénomènes de microévolution — c'est-à-dire d'une évolution très rapide sur quelques générations — concernant des traits morphologiques sont effectivement possibles et déjà à l'œuvre. Par exemple, des chercheurs ont mis en évidence que la pollution lumineuse tendrait à sélectionner les papillons qui se déplacent le moins (Altermatt et Ebert, 2016), allant jusqu'à faire évoluer durablement leurs capacités de mobilité en réduisant la taille de leurs ailes (Van de Schoot *et al.*, 2024). Tout se passe comme si les papillons avaient «appris» à moins se déplacer pour minimiser le risque d'être aspirés par les lampadaires. Dans les faits, par la sélection naturelle, les papillons les plus téméraires ne se sont pas reproduits, puisqu'ils sont morts, au bénéfice des papillons les plus sédentaires. Si ces évolutions peuvent être considérées comme des formes d'adaptation, elles ont des conséquences non évaluées sur la dynamique des populations et leur brassage génétique. Toutefois, pour le moment, aucune étude ne semble avoir mis en évidence un isolement génétique de populations par une fragmentation liée explicitement aux polluants sensoriels.

Quant aux systèmes sensoriels eux-mêmes, pourraient-ils évoluer sous la pression des pollutions lumineuses, sonores et olfactives? Pour le dire simplement : les animaux pourraient-ils faire évoluer leurs yeux pour être moins éblouis, ou leur système auditif pour ne plus percevoir les bruits anthropiques?

.../...



.../...

Pour le moment, il ne semble pas exister de travaux à ce sujet. Néanmoins, comme décrit au chapitre 1, nous savons aujourd'hui que les systèmes sensoriels se développent particulièrement sous la pression des rapports proies-prédateurs. C'est ce qui s'est passé il y a environ 500 millions d'années, lors de l'explosion cambrienne qui a engendré subitement une course à l'armement entre prédateurs et proies. Or les pollutions sensorielles impactent précisément les rapports proies-prédateurs. Par exemple, la pollution lumineuse biaise la pression de prédation en donnant à certains prédateurs un accès plus facile à leurs proies, attirées par les lumières artificielles, ou en rendant les proies plus visibles — y compris celles usant ordinairement de camouflage — dans un environnement nocturne tout à coup plus lumineux. Nous pourrions ainsi imaginer que les systèmes sensoriels des proies s'améliorent, offrant une meilleure détection (et donc évitement) des prédateurs. Les réactions de tactisme pourraient aussi évoluer, conduisant par exemple à un phototactisme moins marqué, mais alors probablement au détriment des facultés de repérage nocturne.

Ces questions sur les perspectives d'évolution du vivant sont passionnantes pour un biologiste ou un écologue, mais elles ne doivent pas nous dédouaner collectivement de réduire les pollutions sensorielles sous prétexte que des possibilités d'adaptations existent. En effet, le pas de temps de l'évolution reste malgré tout en décalage avec l'urgence d'agir face à l'effondrement de la biodiversité. En outre, l'évolution technologique peut être, quant à elle, très rapide, ce qui rend l'adaptation biologique d'autant plus compliquée. Le passage soudain des lampes à décharge aux LED (avec un spectre plus riche en bleu et des effets nouveaux sur les insectes et les chauves-souris) est un exemple parmi d'autres, illustrant le décalage entre innovation humaine et évolution du vivant.

Arrêtons-nous un instant sur ces éclairages domestiques. En France, selon l'estimation de l'Insee (2018), 68,4% des Français vivent en maison individuelle — maison qui possède généralement un espace privé extérieur —, ce qui est bien supérieur à la moyenne européenne de 57,2%. Ainsi, le nombre de points lumineux attribuables à des particuliers est potentiellement très élevé. Et cette tendance est probablement en forte hausse, car installer des éclairages privatifs dans son jardin, sur sa façade ou sur son balcon devient de plus en plus facile — sans même augmenter sa facture d'électricité avec le développement des

LED solaires. Depuis les simples veilleuses jusqu'aux véritables spots de plus en plus puissants, en passant par toutes sortes d'éclairages décoratifs, chacun peut acheter ces éclairages bon marché sur internet ou dans son magasin de bricolage. Ce phénomène illustre très bien ce que les économistes qualifient d'« effet rebond », c'est-à-dire que l'amélioration technologique censée diminuer la consommation énergétique se traduit en réalité par davantage de consommation. Les nouvelles sources lumineuses, comme les LED solaires décoratives, mais aussi les peintures phosphorescentes ou même les plantes OGM luminescentes, sont souvent présentées comme un progrès écologique et apparaissent séduisantes pour le grand public, notamment par leur côté féérique. Pourtant, elles aboutissent la plupart du temps à une multiplication des points lumineux dans l'environnement, avec des effets encore mal évalués sur la biodiversité nocturne. La flexibilité de ces innovations lumineuses rend possible leur installation dans des espaces naturels ou périurbains, déconnectés des réseaux électriques.

Or, comme nous l'avons vu, des éclairages peu puissants engendrent déjà des dégâts sur la biodiversité. En 2018, des chercheurs allemands ont montré que ces veilleuses solaires plantées dans le sol (flux lumineux incident de l'ordre de 1 lux, ou 1 lumen/m<sup>2</sup>), que beaucoup disposent dans leur jardin, constituent des pièges en attirant des coléoptères.

Ainsi, si cette démocratisation de l'éclairage représente un progrès pour « l'accès à la lumière pour tous », elle se traduit en réalité par davantage de pollution lumineuse pour le vivant. Pourtant, nous avons toutes et tous la responsabilité, y compris juridique, de protéger l'environnement ; rappelons qu'« il est du devoir de chacun de veiller à la sauvegarde et de contribuer à la protection de l'environnement, y compris nocturne » (article L. 110-2 du Code de l'environnement). Chacun, comme citoyen, peut agir sur ses propres éclairages mais aussi influencer sur ses commerçants et sa collectivité.

L'espèce humaine, une espèce animale parmi les autres

L'espèce humaine se distingue des autres espèces à bien des égards. Néanmoins, elle reste une espèce animale parmi les

vertébrés mammifères. L'exposition aux pollutions sensorielles est donc susceptible de créer aussi chez nous de l'inconfort, voire de générer de vrais problèmes de santé. Ce rapprochement entre la préservation des écosystèmes et la préservation de la santé humaine est sous-tendu par le concept de *One Health* — « Une seule santé » — proposé par les Nations unies. En France, rappelons que « chacun a le droit de vivre dans un environnement équilibré et respectueux de la santé ». Ce principe est inscrit dans la Charte de l'environnement de 2005, qui a une valeur constitutionnelle. Ce principe a même été reconnu comme une liberté fondamentale par le Conseil d'État dans une décision de septembre 2022.

Le bruit peut engendrer sur les humains une perte d'audition, parfois immédiate par perforation du tympan, mais aussi des impacts biologiques ou comportementaux. Il génère du stress, perturbe le sommeil, diminue notre niveau d'attention, et peut même avoir des conséquences sur les accidents vasculaires cérébraux et les maladies cardiaques. L'Agence européenne pour l'environnement estime que plus de 20 % de la population de l'Union européenne vit dans des zones où le trafic routier atteint des niveaux dangereux pour la santé (EEA, 2020). Il en résulte que la pollution sonore est même la deuxième plus grande menace pour la santé environnementale en Europe après la pollution atmosphérique.

Concernant l'impact de l'éclairage extérieur nocturne sur les humains, des études suggèrent un lien négatif avec la santé. Par exemple, une équipe française de chercheurs a publié une étude en 2025 révélant que le risque de développer un cancer du sein augmente avec le niveau de pollution lumineuse autour du domicile. Néanmoins, ces études mettent en évidence des corrélations, et non pas des liens de cause à effet, sachant que de nombreux aspects peuvent entrer en jeu (ex. : vie en milieu urbain dense, rythme de vie, qualité de l'air, alimentation). Notons que dans son rapport publié en 2021, l'Académie nationale de médecine reconnaît des effets préoccupants de la lumière artificielle nocturne (au sens large : éclairages intérieurs, écrans, travail de nuit, etc.) sur la santé humaine, notamment l'altération de la rétine, la perturbation du sommeil, la désynchronisation

de l'horloge biologique et un risque accru de cancers hormono-dépendants comme le cancer du sein chez les travailleurs de nuit (Dufier et Touitou, 2021).

Enfin, les effets de la pollution olfactive sur les humains sont encore très peu étudiés. Toutefois, les nuisances olfactives affectent indéniablement notre bien-être, ce que les actualités soulignent régulièrement (conflits de voisinage liés aux odeurs de stations d'épuration, d'élevages, de décharges).

Le contact avec la nature — *via* les sensations, les sons, les couleurs, les odeurs — est de plus en plus recherché par les citoyens, comme en témoigne le développement des pratiques récréatives, sportives, voire thérapeutiques, en milieux naturels (voir par exemple les « bains de forêt », ou *shinrin-yoku*, une expérience sensorielle très populaire au Japon). D'ailleurs, la psychologie de l'environnement nous apprend que ces moments d'immersion dans la nature génèrent des émotions et créent des souvenirs forts qui structurent nos valeurs et notre propension à préserver l'environnement. Autrement dit, passer du temps dans la nature, notamment dans l'enfance (mais pas que), nous pousse spontanément à la préserver. Or la perception sensorielle joue un grand rôle dans ces « expériences de nature », y compris *via* l'odorat, dont l'usage ne nous est pas toujours conscientisé au quotidien.

Malgré ces bénéfices pour tout le vivant, la lutte contre les pollutions sensorielles reste une sorte d'impensé sociétal, politique, opérationnel. Pourtant, chaque acteur, public et privé, peut (et doit) agir.



## 4. COMMENT LIMITER OU RÉSORBER LES POLLUTIONS SENSORIELLES?

Ce chapitre aborde les solutions de manière transversale pour les trois pollutions sensorielles. Toutefois, dans le répertoire des solutions connues et expérimentées, la pollution lumineuse bénéficie là encore d'un recul de plusieurs années, contrairement aux pollutions sonores et olfactives. Ce chapitre reflète donc inévitablement ce déséquilibre assumé, même si nous essaierons autant que possible de donner des pistes et des exemples pour la résorption des autres pollutions sensorielles.

### ÉVITER PUIS RÉDUIRE

#### Limiter les émissions à la source

Comme pour toutes les formes de pollutions, la meilleure des stratégies est de les limiter à la source, c'est-à-dire d'éviter leur émission dans l'environnement — ceci est d'ailleurs valable pour toute perturbation anthropique, sur la base de la séquence éviter-réduire-compenser. Rappelons que les pollutions sensorielles ont l'avantage d'être facilement réversibles, du fait de leur nature même. Une fois la source d'émission stoppée, la rémanence dans l'environnement est donc très temporaire pour les odeurs et nulle pour la lumière et le bruit. Ainsi, une réduction à la source de ces pollutions sensorielles s'avère immédiatement efficace, contrairement à d'autres pollutions persistantes, voire « éternelles ».

Pour limiter ces pollutions à la source, une marge de manœuvre importante existe sans que nos sociétés perdent de confort et d'usage. C'est en particulier vrai pour l'éclairage nocturne. Dans bien des situations, des éclairages passifs seraient en réalité suffisants, par exemple des catadioptres sur certains axes routiers réservés aux voitures, qui aujourd'hui ont des phares très puissants. De nombreux éclairages installés sans évaluation réelle

du besoin sont aussi mal orientés, ne ciblent pas la surface utile ou le moment opportun. En n'éclairant qu'en cas d'usage, on peut déjà restreindre considérablement la durée d'émission du polluant lumineux sans que les usagers voient de différence. Deux pistes sont alors à explorer.

La première réside dans le progrès technique. Par exemple, des éclairages qui cibleront davantage les flux lumineux limiteront les flux perdus vers les milieux naturels adjacents, le développement de moteurs électriques en remplacement des moteurs thermiques diminuera mécaniquement la pollution sonore et la pollution olfactive. Cette perspective « techno-solutionniste » est prometteuse. Parfois, elle peut véritablement résoudre un problème. Par exemple, la mise sur le marché de luminaires à des fréquences de clignotement adaptées à la vision de la faune, et pas uniquement à la vision des humains, permettrait de continuer à éclairer tout en évitant un effet stroboscopique pour les animaux. Toutefois, cette approche ne doit pas nous dédouaner de remettre en question nos activités de manière beaucoup plus profonde et transversale. Nous avons vu aussi précédemment que le progrès technique peut avoir des effets pervers contre-productifs (effet rebond).

La seconde piste est la sobriété, qui reste la priorité. L'invitation première est donc de réinterroger nos pratiques, en l'occurrence de revoir nos besoins d'éclairage (ex. : plages horaires, nombre de points lumineux, quantité de lumière), de limiter notre consommation de l'espace ou notre fréquentation dans certains secteurs sensibles (ex. : zones de quiétude), de réduire l'usage des véhicules individuels au profit des transports en commun, etc. C'est donc vers plus de sobriété qu'il faut tendre, sobriété que l'on peut définir comme un usage raisonné des ressources. Elle relève de choix individuels, mais notre marge de manœuvre dépend complètement de notre position sociale (ex. : notre capacité à acheter une voiture électrique) et du modèle global de notre société (ex. : politique des transports, politiques d'aménagement du territoire).

Depuis peu, la sobriété commence à devenir un objectif affiché en matière de politique environnementale. Par exemple, un plan de sobriété énergétique qui traite notamment d'éclairage

nocturne a été publié en 2022 par le gouvernement français. La Stratégie nationale pour la biodiversité — grand plan de l'État pour structurer la politique de biodiversité de la France jusqu'en 2030 — prévoit elle aussi de « régler le problème [de la pollution lumineuse] à la source en travaillant sur la mise en marché et sur le choix des consommateurs des équipements lumineux ».

Mais nous sortons du champ unique de la science. La sobriété sous-entend de redéfinir collectivement nos priorités, de faire éventuellement des compromis, voire des « sacrifices », de renoncer à certains plaisirs ou à certaines activités. Par exemple, les éclairages de mise en valeur des bâtiments ou des jardins si typiques dans certains villages sont-ils vitaux à notre bien-être ? Les feux d'artifice si caractéristiques de nos festivités sont-ils indispensables au regard des impacts que leurs détonations ont sur les oiseaux ? L'écologie ne peut pas répondre seule à cette question. En revanche, elle peut éclairer la société dans ses choix, par exemple en indiquant quelles activités sont les plus polluantes. Associée à d'autres sciences, notamment les sciences sociales, elle peut aider à trouver un chemin vers les meilleurs ratio gain/perte. Il peut en résulter un arbitrage gagnant-gagnant : sacrifier les activités à la fois les moins consensuelles et les plus polluantes.

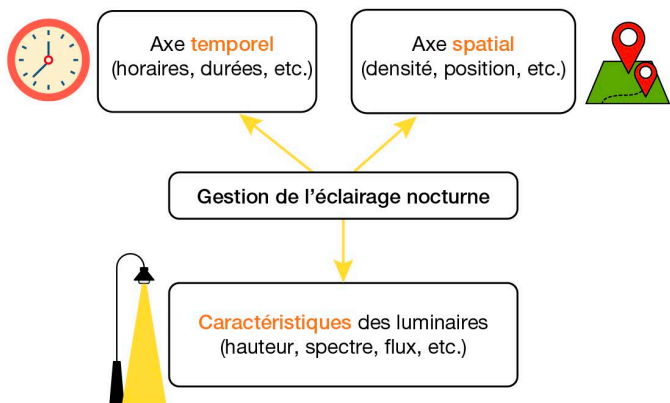
### Réduire les impacts

Lorsque l'émission de polluants sensoriels ne peut pas être évitée (ex. : un éclairage nocturne indispensable, une activité bruyante ou odorante sans alternative possible), il existe certains leviers pour réduire les impacts.

De nombreux paramètres de l'éclairage nocturne, comme nous l'avons vu, jouent sur le niveau des impacts biologiques et écologiques. On peut par exemple moduler la dimension temporelle : coupure en cœur de nuit, éclairage activé par le mouvement ou sur demande, protocoles de gradation en fonction des horaires, etc. Des spectres lumineux jaune ambre (voire rouges dans certains cas), considérés comme moins dommageables pour la faune, devraient aussi être privilégiés. Ces pratiques permettent de continuer à bénéficier du confort souhaité par la population, tout en limitant les impacts sur la biodiversité (sans toutefois les supprimer) (encadré 5).

## ENCADRÉ 5. GÉRER L'ÉCLAIRAGE NOCTURNE, UNE VASTE PALETTE D' ACTIONS

Les mesures de gestion de l'éclairage nocturne peuvent être regroupées en trois axes : temporel, spatial et technique (figure 10).



**Figure 10.** Les trois grands axes de gestion de l'éclairage nocturne  
(© Romain Sordello, Musy *et al.*, 2026).

### Axe temporel

L'objectif est d'éclairer le moins longtemps possible au cours de la nuit, ce qui peut se faire de multiples manières (coupure franche en cœur de nuit, abaissement des flux au cours de la nuit, éclairage par détection des piétons ou des véhicules). Des milliers de communes pratiquent l'extinction en cœur de nuit, avec des horaires variables autour de 22h-6h. Des expérimentations en France ont permis de constater les bénéfices de cette pratique sur les chauves-souris et les insectes. Par exemple, sur la métropole Nice Côte d'Azur, l'extinction totale estivale de l'éclairage public en été (du 1<sup>er</sup> juin au 15 août), testée dès 2024 à Colomars et Saint-Martin-du-Var sur des corridors écologiques nocturnes en site Natura 2000, a fortement bénéficié aux chauves-souris : leur activité a été multipliée par 6 pour les murins et par 20 pour les rhinolophes, et seulement par 2 et par 6 avec l'extinction partielle (23h-5h). Cette mesure ne connaît pas d'oppositions, car elle intervient quand les jours sont longs, et elle est désormais reconduite chaque année.

.../...

.../...

Toutefois, s'intéresser au cœur de nuit ne suffit pas du fait que de nombreuses espèces sont actives en début et en fin de nuit, comme évoqué au chapitre 2. Un éclairage réduit ou intermittent aux extrémités de nuit peut être une réponse complémentaire. Une étude a montré qu'un éclairage abaissé et augmenté uniquement au passage de véhicules (ce que l'on appelle le *dimming*) permettait de diminuer le nombre d'insectes piégés par les lampadaires comparé à une rue en éclairage constant (Bolliger *et al.*, 2020).

De plus en plus de communes mettent en œuvre ce genre de télégestion. Par exemple, dans son plan Lumière publié en 2023, la métropole de Montpellier Méditerranée a prévu de pratiquer l'abaissement de puissance sur l'intégralité du parc «avec une valeur d'abaissement minimale de 50%, à partir de 22h, portée à 90% pour les cheminements piétons des parcs et jardins ouverts la nuit, en association avec des dispositifs de détection de présence».

### Axe spatial

Les éclairages nocturnes doivent être évités autant que possible dans les milieux naturels. Dans le même temps, certains sites anthropisés sont aussi très sensibles, car ils offrent des habitats pour la faune en ville et font souvent l'objet d'illuminations : bords de cours d'eau, ponts, églises, monuments, falaises, chemins en zones rurales. Si la mise en lumière reste l'objectif d'une collectivité, il est aujourd'hui possible techniquement de faire en sorte qu'elle soit moins impactante. Par exemple, à Blois, l'illumination du pont Jacques-Gabriel a été conçue en tenant compte de la biodiversité, avec notamment une plage horaire restreinte, un éclairage au plus près de l'édifice et différents scénarios colorimétriques en fonction des saisons.

### Axe technique

De manière générale, les flux doivent être ramenés vers le sol et ne pas exposer les lieux sensibles (ex. : cavités d'arbres, mares). Malgré une orientation optimale vers le bas, si la lumière n'est pas assez canalisée, les milieux naturels adjacents (ex. : prairies le long d'une route) peuvent rester exposés à l'éclairage sans raison. Dans ces situations, des coupe-flux arrière peuvent être la solution, réduisant aussi la visibilité des sources par la faune volante. Le choix des sources lumineuses concerne également leur composition spectrale. Si la réglementation impose désormais un blanc légèrement chaud pour l'éclairage de voirie, il est conseillé d'aller plus loin et de privilégier les spectres étroits situés dans l'ambre pour minimiser les impacts écologiques.

.../...

.../...

Plusieurs territoires généralisent désormais l'implantation de LED « chaudes » (dont la température de couleur est située entre 2200 K et 2700 K), comme les métropoles de Nice Côte d'Azur, de Rennes ou de Lille. Des LED ambrées ont aussi été expérimentées, par exemple sur le pont Napoléon-III à Lille.

En ce qui concerne les odeurs, la question est plus compliquée. En effet, une fois que les composés volatils sont émis dans l'environnement, il est difficile de les détruire, de les transformer ou de les recouvrir pour neutraliser leur action odorante. Il existe différents systèmes de filtres : biofiltres, matériaux neutralisant les odeurs (ex. : charbon actif), épurateurs chimiques, et même diffuseurs d'huiles essentielles. Ces pistes sont intéressantes mais il existe très peu de retours d'expérience, en dehors de certains usages dans l'industrie pour réduire les perturbations olfactives à l'intérieur des bâtiments, et, dans l'agriculture, pour réduire les nuisances olfactives sur le voisinage. Par exemple, en France, à la suite d'un contentieux, un agriculteur a installé des diffuseurs d'huile essentielle de framboise pour couvrir les odeurs générées par son élevage de canards. Avec cet exemple nous touchons de près la différence d'approche selon que le sujet est traité pour les humains ou pour la faune sauvage. En effet, de fortes odeurs de canard — bien que désagréables pour l'être humain — sont bien plus informatives de la situation réelle (ex. : forte compétition locale, éventuel risque épidémiologique) que des arômes de framboise, qui constituent un leurre (absence de ressource alimentaire réelle). Nous sommes donc encore très loin, pour des questions à la fois d'efficacité et de faisabilité, de voir ces techniques transposées *in situ* pour traiter les effets des odeurs anthropiques sur les écosystèmes.

Enfin, les barrières végétales (ex. : zones tampons d'arbres haies) ou les murs (antilumière, antibruit, antiodeur) sont aussi des solutions souvent proposées, à la fois pour la lumière, les sons et les odeurs. Ces structures ont en effet théoriquement la capacité d'arrêter la lumière, de diminuer le bruit et de réduire la propagation des composés volatils. Toutefois, nous manquons d'évaluation pour vraiment le confirmer. De plus, ces solutions ne sont que partiellement satisfaisantes, puisque construire des

murs introduit malencontreusement de nouvelles barrières aux déplacements de la faune dans le paysage, et planter des haies expose volontairement des végétaux, et potentiellement la faune qui les fréquente, à ces perturbations, en les « sacrifiant » pour le reste de l'écosystème.

## COMMENT CES POLLUTIONS SONT-ELLES GÉRÉES EN FRANCE ?

### Pollution lumineuse : la France à l'avant-garde

La pollution lumineuse fait l'objet d'un combat de longue date en France. Plusieurs associations portent ce sujet dans la société civile à l'échelle nationale et sur les territoires. Citons l'Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturne (ANPCEN), historiquement engagée et entièrement dédiée à l'environnement nocturne, mais aussi France Nature Environnement ou encore la Ligue de protection des oiseaux. Depuis déjà plusieurs années, les professionnels de l'éclairage, réunis notamment au sein de l'Association française de l'éclairage, ont aussi pris conscience de la nécessité de tenir compte des impacts de l'éclairage sur la biodiversité. Plusieurs laboratoires de recherche mènent des études à ce sujet (ex. : MNHN, CNRS).

Aujourd'hui, la France se retrouve à l'avant-garde mondiale dans la lutte contre la pollution lumineuse à plusieurs titres, en particulier une réglementation ambitieuse, une prise en compte dans les territoires et des démarches de labellisation.

Au niveau législatif et réglementaire, depuis le Grenelle de l'environnement (2007), le Code de l'environnement prévoit que « pour prévenir ou limiter les dangers ou trouble excessif aux personnes et à l'environnement causés par les émissions de lumière artificielle [...], des prescriptions peuvent être imposées, pour réduire ces émissions, aux exploitants ou utilisateurs de certaines installations lumineuses » (article L. 583-1). Une série de décrets et d'arrêtés ministériels ont été publiés pour mettre en œuvre cette politique publique. Notamment, un arrêté ministériel structurant publié en 2018 impose des prescriptions temporelles et/ou techniques par catégories d'usage

de l'éclairage. Aussi, en 2016, la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages (loi n° 2016-1087 du 8 août 2016) — dite « loi biodiversité » — a souligné dans le Code de l'environnement l'importance de la dimension nocturne de notre environnement (ex. : paysages, devoir de protection).

Dans les territoires, les parcs naturels régionaux et les parcs nationaux ont été pionniers — à titre d'exemple, le Parc naturel régional des Causses du Quercy travaille à la protection du ciel noir quasiment depuis sa création en 1999, avec de premières actions menées dès 2005. Des milliers de communes pratiquent de manière volontaire l'extinction de leur éclairage public en cœur de nuit. Dans les contextes plus urbains, plusieurs villes et métropoles ont développé des plans et des programmes pour la modernisation de leur parc d'éclairage afin de tendre vers des parcs répondant mieux aux usages, moins consommateurs d'énergie et plus respectueux de la biodiversité (ex. : métropoles de Rennes, de Nice Côte d'Azur ou de Montpellier Méditerranée). Un « urbanisme lumière » est ainsi apparu dans les années 2010, visant à planifier l'éclairage public sur le territoire d'une collectivité en tenant compte des différents enjeux, au travers de plans lumière, de schémas directeurs d'aménagement lumière (SDAL) ou encore de schémas de cohérence d'aménagement lumière (SCAL). Ces plans intègrent de plus en plus systématiquement les enjeux de biodiversité, y compris sur des territoires urbains où les besoins en éclairage sont forts et où s'entremêlent parfois des problématiques d'insécurité.

Enfin, la France se démarque par l'ampleur des démarches de labellisation. L'ANPCEN organise depuis 2009 un concours permettant de valoriser les communes vertueuses, le concours Villes et Villages étoilés. En 2020, 722 communes étaient labellisées de 1 à 5 étoiles selon l'ampleur de leurs actions en faveur de la nuit. Par ailleurs, 7 territoires ont intégré le réseau des Réserves internationales de ciel étoilé, labellisées dans le monde par l'association américaine Dark Sky (comptant 24 réserves en 2025), qui dispose désormais d'une antenne française, Dark Sky France. La première réserve en France fut celle du pic du Midi de Bigorre en 2013.

## Pollution sonore : une approche en silos centrée sur la santé humaine

La pollution sonore attire l'attention des instances internationales depuis déjà plusieurs années. En 1996, la Commission européenne publiait un Livre vert sur *La politique future de lutte contre le bruit* (Commission européenne, 1996). En 1999, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) produisait un premier rapport avec des lignes directrices et des recommandations (World Health Organization, 1999), mis à jour en 2018 pour l'Europe. Plus récemment, c'est le rapport « Frontières » de 2022 du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) qui a placé la pollution sonore à l'agenda des préoccupations internationales (PNUE, 2022). Il ressort de ces diverses lignes directrices deux grands enseignements :

- elles sont bien souvent déclinées par types de bruit (ex. : transport, loisir, industrie), mettant en évidence l'absence d'une politique transversale et globale sur la pollution sonore ;
- elles visent très peu les écosystèmes, car leur motivation est avant tout de réduire les risques du bruit sur la santé humaine.

La France s'inscrit dans le sillage de ce constat international. Elle s'est, elle aussi, saisie du sujet depuis déjà quelques années, avec une approche par types de bruit : bruits des transports, bruits des activités industrielles ou commerciales, bruits de voisinage. Par exemple, concernant les transports terrestres et aériens, l'État français a mis en place une politique à la fois préventive et curative depuis la loi relative à la lutte contre le bruit (loi n° 92-1444 du 31 décembre 1992), et ce cadre a été renforcé en 2002 par l'application de la directive 2002/49/CE du 25 juin 2002 sur l'évaluation et la gestion du bruit dans l'environnement. Concernant les bruits hors transport, une réglementation nationale fixe des niveaux d'émissions sonores maximaux, notamment pour les activités industrielles, artisanales ou commerciales, les bars et les discothèques, les activités de sports et de loisirs. Néanmoins, de manière concrète sur le terrain, les actions de réduction des nuisances sonores semblent se limiter assez souvent à l'élaboration de murs antibruit (ex. : au bord des routes) pour réduire les nuisances sonores pour les

habitants. Ces structures ne sont pas une réelle solution, car elles rajoutent des barrières physiques dans le milieu pour la faune.

*In fine*, la pollution sonore reste donc peu considérée du point de vue de la biodiversité. Pourtant, le Code de l'environnement se fixe bien comme objectif de « prévenir, supprimer ou limiter la pollution sonore », qu'il définit comme « l'émission ou la propagation des bruits ou des vibrations de nature à présenter des dangers, à causer un trouble excessif aux personnes, à nuire à leur santé ou à porter atteinte à l'environnement » (article L. 571-1).

La pollution sonore en mer et sous-marine est davantage reconnue et mise en œuvre. Ce problème est précisément défini dans le Code de l'environnement avec la pollution lumineuse : « La "pollution" consiste en l'introduction directe ou indirecte, par suite de l'activité humaine, de déchets, de substances, ou d'énergie, y compris de sources sonores sous-marines ou de sources lumineuses d'origine anthropique, qui entraîne ou est susceptible d'entraîner des effets nuisibles pour les ressources vivantes et les écosystèmes marins, et notamment un appauvrissement de la biodiversité, des risques pour la santé humaine, des obstacles pour les activités maritimes, et notamment la pêche, le tourisme et les loisirs ainsi que les autres utilisations de la mer, une altération de la qualité des eaux du point de vue de leur utilisation, et une réduction de la valeur d'agrément du milieu marin » (article L. 219-8).

Au niveau sociétal, le sujet prend de l'ampleur aujourd'hui, tout en restant cantonné à des problématiques de nuisances pour les humains. Les conflits entre riverains qui surgissent régulièrement dans l'actualité en témoignent. On peut évoquer le procès très médiatique du coq Maurice de Rochefort, en Charente-Maritime, accusé de nuisances sonores par le voisinage, le tribunal ayant finalement donné raison à l'oiseau. Un autre exemple met en évidence la vision anthropocentrée accordée pour l'instant à cette problématique : après plusieurs années de procédures, les propriétaires d'une mare en Dordogne — occupée par des amphibiens jugés bruyants par les habitants voisins — ont été condamnés à la reboucher et donc à détruire l'habitat de ces espèces protégées.

La loi visant à définir et protéger le patrimoine sensoriel des campagnes françaises (loi n° 2021-85 du 29 janvier 2021) vient introduire encore davantage d'ambiguïté. Cette loi a complété l'article L. 110-1 du Code de l'environnement, incluant ainsi les sons et les odeurs qui caractérisent les espaces, les ressources et les milieux naturels terrestres et marins, dans le patrimoine commun de la nation (au même titre que les paysages diurnes et nocturnes depuis la loi biodiversité de 2016, vu plus haut). À la suite de cette loi, les services régionaux de l'inventaire du patrimoine, sous l'égide du ministère de la Culture, ont ainsi le soin d'identifier et de qualifier l'identité culturelle des territoires ruraux, y compris leurs éléments sonores et olfactifs, pour contribuer à les valoriser. Si cette loi devait initialement viser des « symboles » ruraux (chant du coq, odeur du fumier, son des cloches), elle pourrait créer malgré elle une ouverture vers la reconnaissance de certains milieux semi-naturels (ex. : agricoles), et donc des cortèges d'espèces associés comme éléments du patrimoine sensoriel acoustique et olfactif.

#### Pollution olfactive : une considération encore marginale

Les pollutions olfactives sont beaucoup moins prises en compte que les pollutions lumineuses et sonores. Elles ne font l'objet d'aucune réelle politique publique environnementale, et très peu de mesures sont prises sur le terrain.

Pourtant, les choses avaient plutôt bien commencé. On retrouve en effet une loi très ancienne spécifiquement dédiée à la lutte contre les odeurs, même si elle ne citait pas l'impact environnemental. La loi relative à la lutte contre les pollutions atmosphériques et les odeurs (loi n° 61-842 du 2 août 1961) stipulait ainsi que les « immeubles, établissements industriels, commerciaux, artisanaux ou agricoles, véhicules ou autres objets mobiliers possédés, exploités ou détenus par toutes personnes physiques ou morales, devront être construits, exploités ou utilisés [...] afin d'éviter les pollutions de l'atmosphère et les odeurs qui incommode la population, compromettent la santé ou la sécurité publique, ou nuisent à la production agricole, à la conservation des constructions et monuments ou au caractère des sites ». Mais, fait curieux, ce texte fut

abrogé par la loi relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire (loi n° 2006-686 du 13 juin 2006), et *a priori* son contenu n'a pas été repris depuis. La lutte contre les nuisances olfactives aurait donc régressé au niveau législatif au fil du temps ?

Aujourd'hui, les nuisances olfactives sont quasi inexistantes de l'ensemble des Codes qui régissent notre droit positif et, lorsqu'elles sont évoquées, c'est essentiellement vis-à-vis des humains. Deux exemples :

– dans le Code de la santé publique, les odeurs sont évoquées en association avec les pollutions atmosphériques : les « dispositions relatives à la lutte contre les pollutions atmosphériques et les odeurs, prises dans l'intérêt de la santé publique » (article L. 1335-1 du Code de la santé publique). Depuis 2023, un décret portant sur des règles sanitaires d'hygiène et de salubrité des locaux d'habitation et assimilés (décret n° 2023-695 du 29 juillet 2023) stipule que les « odeurs, éclairages, illuminations ou bruits, qu'une personne en soit à l'origine ou que ce soit par l'intermédiaire d'une personne ou d'une chose dont elle a la garde ou d'un animal placé sous sa responsabilité, ne peuvent, par leur intensité, leur durée ou leur répétition, porter atteinte à la qualité de l'air, à la tranquillité du voisinage ou à la tranquillité et la santé des occupants des locaux d'habitation » (article R. 1331-39 du Code de la santé publique) ;

– dans le Code minier, des infractions sont prévues, par exemple en cas de « production ou détention de déchets dans des conditions de nature à polluer le sol, l'air ou les eaux, à entraîner des dommages sur la flore et la faune, à dégrader les sites ou les paysages, à engendrer des bruits ou des odeurs et, d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement » (article L. 512-2 du Code minier).

Sur le terrain, comme pour les nuisances sonores, les nuisances olfactives émergent, elles aussi, comme un sujet sociétal, mais pour le moment limité à la gêne des humains. On peut même évoquer à ce sujet un dossier ancien : la fabrication de farines animales par une usine d'équarrissage implantée en Creuse générerait entre autres des nuisances olfactives insupportables — « une puanteur écœurante qui vous réveillait en pleine nuit » — due

à la cuisson des carcasses (Nouaillas, 2019). Ce conflit local des années 1970-1990 avait pris une telle ampleur qu'il était devenu peu à peu un dossier national.

Aujourd'hui encore, les nuisances olfactives se retrouvent régulièrement au cœur de conflits, notamment en milieu rural vis-à-vis des activités agricoles ou industrielles (ex. : élevage, équarrissage). Par exemple, la Cour de cassation a confirmé récemment la condamnation d'un agriculteur de l'Oise à verser plus de 100 000 euros de dommages et intérêts à des riverains pour les nuisances causées par son exploitation. Ici aussi, la reconnaissance des odeurs comme patrimoine commun de la nation par la loi de 2021, évoquée précédemment, est censée répondre à ce type de querelles. À noter qu'une proposition de loi « visant à préserver les activités traditionnelles et usages locaux des actions en justice de voisins sensibles aux bruits et aux odeurs » était à l'étude. Un tel texte pourrait légitimer, au titre de la tradition, certains bruits et certaines odeurs pourtant sources de nuisances.

Sur le plan opérationnel, les odeurs sont plutôt vues pour l'instant comme un levier d'ingénierie écologique, là encore dans une approche anthropocentrée, afin de protéger des cultures ou des stocks contre certaines espèces considérées comme nuisibles (ex. : rongeurs, blaireau). Comme nous l'avons vu, la diffusion d'odeurs, notamment d'huiles essentielles, est expérimentée pour neutraliser les nuisances olfactives de certains sites agricoles ou industriels (décharge, station d'épuration, complexe pétrochimique, usine agroalimentaire). Aujourd'hui, l'utilisation d'odeurs ou de sons est également envisagée comme un outil du génie écologique dans des programmes de restauration (encadré 6).

Nous voyons qu'il existe des solutions pour résorber les pollutions sensorielles, en particulier en limitant leurs émissions à la source. Afin de dépasser la gestion des sources de pollutions sensorielles au cas par cas (ex. : lampadaire après lampadaire, usine après usine) — qui serait bien trop chronophage et dépourvue de cohérence —, il est indispensable d'adopter une stratégie de planification à l'échelle des territoires. C'est ici que les trames écologiques peuvent se révéler une approche intéressante.

## ENCADRÉ 6. MANIPULER LA PERCEPTION SENSORIELLE À BON ESCIENT, UNE PISTE SÉRIEUSE ?

L'émission volontaire de sons, d'odeurs ou de lumière est une technique répandue, par exemple en agriculture pour limiter les dégâts sur les productions agricoles ou forestières. En jouant sur les mécanismes de la perception sensorielle (ex. : effet de masquage, effet de tromperie, paysage de la peur) par des dispositifs d'effarouchement sonore, des odeurs repoussantes ou des leurres visuels, l'objectif est de créer volontairement des pièges ou au contraire de provoquer la fuite des animaux jugés « indésirables ».

Plus étonnant, l'émission de stimulus sensoriels artificiels est envisagée comme un levier pour la restauration écologique. Bien que rarement expérimentée, l'idée a été développée il y a déjà plusieurs décennies. Elle repose sur un enrichissement sensoriel du milieu consistant à diffuser de manière temporaire des indices sensoriels ciblés dans l'environnement. Par exemple, la diffusion de sons ou la dissémination d'odeurs favoriseraient l'utilisation de passages à faune. Dès les années 1990, des naturalistes français ont eu l'idée d'agrémenter d'indices olfactifs un passage à faune particulièrement long qui n'était pas exploité (Vignon et Waczak, 1999). Pour ce faire, ils ont déposé des fèces de cerf, indices sensoriels naturels qui ont l'avantage d'être faciles à collecter et dont la durée du pouvoir olfactif est longue. Il s'avère qu'à la suite de cette stimulation olfactive, les ongulés ont tout à coup emprunté l'ouvrage, non seulement le cerf, mais également le chevreuil et le sanglier. Ce résultat laisse ainsi entrevoir le fort potentiel des indices olfactifs pour stimuler l'espèce ciblée, mais également des taxons proches. La stimulation peut ensuite être entretenue grâce au passage des animaux qui déposent leurs propres indices sensoriels, rendant l'ouvrage durablement attractif.

Plus récemment, d'autres travaux réalisés en France ont montré que diffuser des chants d'amphibiens peut augmenter la fréquentation des crapauds sous des voies ferrées pour certaines espèces de grenouilles ou de tritons (Testud *et al.*, 2020). Ces techniques d'enrichissement sensoriel mériteraient d'être approfondies. Ces premières expérimentations sont prometteuses pour le génie écologique. Toutefois, un certain recul est nécessaire sur les conséquences de ces leurres sur le plan de la structuration sociale et de la démographie des populations (voir par exemple Rosell *et al.*, 2023).



## 5. LES TRAMES ÉCOLOGIQUES, UNE PERSPECTIVE POUR LES TERRITOIRES?

Une stratégie spatialisée pour éviter, réduire et compenser les pollutions sensorielles apparaît indispensable sur les territoires. Dans ce chapitre, nous considérerons le terme de « territoire » dans un sens large : il peut notamment correspondre à l'échelle d'une collectivité territoriale (communes, intercommunalités, départements, régions) ou d'un espace naturel (réserves naturelles, parcs naturels régionaux ou parcs nationaux).

Une telle approche spatialisée permet de donner du sens et de la cohérence afin de :

- traiter la biodiversité dans son ensemble en considérant les différents milieux (ex. : forêts, cours d'eau, prairies) et les cortèges d'espèces associés ;
- prendre en compte le caractère dynamique de la biodiversité (ex. : cycles de vie, déplacement, migration) ;
- procurer une vision d'ensemble qui couvre des infrastructures à la fois publiques et privées (ex. : communes, entreprises, particuliers), et ce, quelles que soient leurs fonctions (ex. : habitation, commerce, loisir, transport) ;
- viser un fonctionnement écologique optimal tout en tenant compte des usages sur le territoire ;
- fournir des supports visuels (cartographies) servant d'aide à la décision ;
- diversifier les actions en distinguant ce qui est à préserver de ce qui est à restaurer, avec des niveaux de priorité variables ;
- déployer la chaîne complète pour éviter d'abord toute nouvelle pollution, réduire les impacts résiduels et, le cas échéant, compenser les impacts inévitables (séquence dite « ERC »).

Dans ce domaine de la planification territoriale, les trames écologiques — telles que la trame verte et bleue en France — ont été développées en ce sens et ont pris une place importante.

S'inspirant du concept de réseaux écologiques proposé par l'écologie du paysage, ces trames sont mises en place depuis plusieurs décennies à travers le monde à différentes échelles, du local à l'international. Les trames écologiques constituent par conséquent une perspective très prometteuse pour considérer la problématique des pollutions sensorielles dans les territoires.

Ainsi, ce dernier chapitre est un chapitre d'ouverture. Il introduit la prise en compte des pollutions sensorielles par les trames écologiques comme une piste possible, à débattre, sans avoir vocation à détailler exhaustivement les principes et la mise en œuvre de cet outil de planification.

## LE CONCEPT DE RÉSEAUX ÉCOLOGIQUES

Le besoin de préserver à la fois des surfaces d'habitats et des connexions entre ces habitats a fait émerger dans la communauté scientifique, puis politique, la notion de « réseaux écologiques ». On peut se représenter ces réseaux comme des ensembles d'habitats (milieux naturels et semi-naturels) de qualité suffisante et connectés entre eux. Ils favorisent la libre circulation des espèces et donc le fonctionnement écologique ainsi que le brassage génétique.

On peut les décrire schématiquement comme composés de noyaux et de corridors selon le modèle de l'écologie du paysage évoqué au chapitre 2 (figure 11). Les noyaux peuvent être définis comme les zones présentant une forte biodiversité, répondant aux besoins d'habitats des espèces et leur permettant d'accomplir leur cycle de vie complet. Les corridors, quant à eux, sont des enveloppes d'habitats qui relient les noyaux, répondant au besoin de déplacement des espèces.

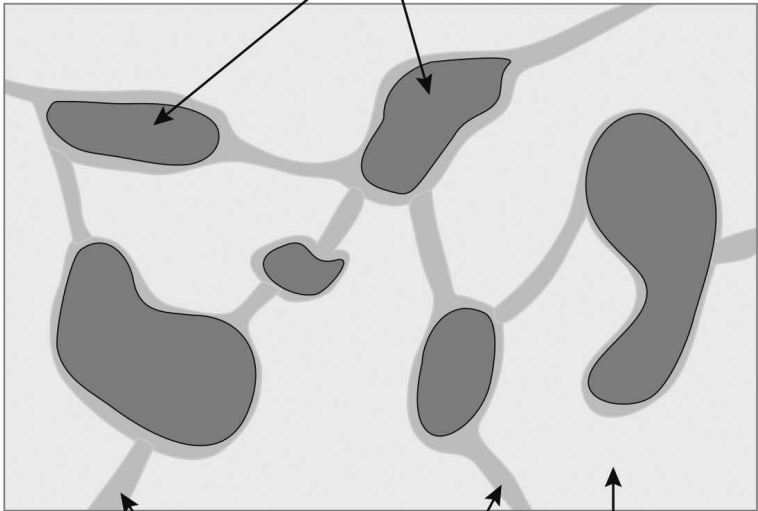
Une image simple à se représenter est celle de boisements (noyaux) reliés par des haies (corridors) dans un espace agricole (matrice). Dans le même temps, la connectivité d'un réseau écologique ne se résume pas à « tracer des traits ». Il existe ainsi une multitude de corridors possibles (ex. : forme, taille, largeur, hétérogénéité), allant de structures linéaires et contiguës à des éléments plus ou moins proches (en « pas japonais »).

Par exemple, un réseau de mares assurera des lieux de vie et des supports de déplacements de proche en proche pour des amphibiens ou des libellules.

**Réservoirs de biodiversité**

(ex. : taches, noyaux, cœurs de nature)

Espaces où la biodiversité est la plus riche et la mieux représentée, où les espèces peuvent vivre et/ou à partir desquels elles dispersent



**Corridors écologiques**

Voies de déplacements entre réservoirs (déplacements quotidiens, dispersion, migration)

**Continuités écologiques**  
=  
Réservoirs de biodiversité  
+  
Corridors écologiques

**Matrice écologique**

Espace plus ou moins hostile à la vie et aux déplacements de la biodiversité

**Figure 11.** Représentation schématique d'un réseau écologique (source : Sordello, 2017c ; licence CC-BY).

Finalement, une grande diversité d'éléments paysagers, y compris façonnés par l'homme, sont susceptibles de faire partie de ces réseaux écologiques, selon leur qualité, leur configuration, leur contexte : forêts, rivières et ripisylves, zones humides, mais aussi milieux agricoles tels que haies, prairies ou pelouses calcicoles pâturées, jachères, bords de champs.

Dans l'histoire de la protection de la nature, les réseaux écologiques ont constitué une proposition intéressante :

- pour dépasser la préservation d'habitats individuels en incluant la connectivité. Le terme de « réseau » fait référence ici à une trame qui fonctionne ensemble, et pas simplement à une collection de sites (ex. : réseau d'aires protégées) ;

- pour préserver la biodiversité partout, et pas seulement dans les zones les plus sensibles. Par définition, les aires protégées sont limitées aux zones présentant des enjeux forts. Les réseaux écologiques, quant à eux, se présentent comme un outil d'aide à la planification territoriale. Ils se révèlent pertinents à différentes échelles, du national au local, aussi bien en contexte naturel qu'en contexte urbain.

En outre, les réseaux écologiques sont aujourd'hui plébiscités par les scientifiques comme un moyen de favoriser l'adaptation spatiale des aires de répartition dans le contexte du changement climatique. Par exemple, un réseau de prairies aidera des papillons à migrer en altitude pour suivre le climat qui leur correspond.

## LES TRAMES ÉCOLOGIQUES : DES OUTILS DE PLANIFICATION PLÉBISCITÉS À TRAVERS LE MONDE

Le modèle des réseaux écologiques est schématique. Dans le même temps, il est pratique et opérationnel, notamment dans des pays comme la France, où la biodiversité est mise à rude épreuve face à la consommation intarissable d'espaces due à la manière dont on aménage notre territoire. Cette approche n'exonère pas de protéger la nature partout et de réduire la pression humaine partout. Toutefois, les réseaux écologiques permettent de prioriser, de définir les endroits où la biodiversité



doit être préservée ou restaurée. Ce faisant, ils invitent aussi à s'interroger sur ces espaces situés en dehors du réseau — la matrice paysagère.

Préserver et restaurer des réseaux écologiques est une des manières possibles de répondre au phénomène de disparition et de fragmentation des habitats. Depuis les vingt dernières années, cette approche spatialisée et intégratrice s'est imposée à travers le monde comme un levier opérationnel pour prendre en compte la biodiversité dans les politiques publiques de territoire, d'aménagement et d'urbanisme.

Dans de nombreux pays, la conservation de la nature a généralement débuté par la protection de certaines zones sensibles — parcs nationaux, réserves, etc. —, puis a évolué pour tendre vers une vision plus globale afin de préserver non plus seulement la nature, mais la biodiversité — au-delà des périmètres. Cette vision a trouvé une forme de réponse dans les réseaux écologiques, qui permettent de considérer la biodiversité dans son ensemble sur un territoire. Aujourd'hui, les réseaux écologiques sont reconnus comme un outil clé pour la conservation de la nature, et promus par les instances internationales (UICN, Commission européenne, traités internationaux, etc.).

Dans le monde, de nombreux États ont mis en œuvre des politiques de réseaux écologiques depuis la fin des années 1990. En Europe, les États membres se sont engagés dès 1992 dans la constitution d'un réseau écologique paneuropéen pour permettre la conservation des écosystèmes et des habitats, à instaurer aux niveaux national, régional ou local. Plusieurs pays membres ont initié ce type de programme national : par exemple, la Belgique (Vlaams Ecologisch Netwerk en Flandres et Structure écologique principale en Wallonie), l'Estonie (Green Network), l'Allemagne (Biotopverbund) et la Hongrie (National Ecological Network), ou encore la France (trame verte et bleue).

C'est en 2007 que la politique publique de la trame verte et bleue a démarré en France. Inscrite dans la loi dès 2009, elle vise à former des continuités écologiques terrestres et aquatiques comprenant des réservoirs de biodiversité (les noyaux) et des corridors écologiques, identifiés pour différents types de milieux

(appelés « sous-trames ») : milieux boisés, ouverts, humides, aquatiques, littoraux. Cette politique se déploie donc, depuis déjà presque vingt ans, autour de trois échelles territoriales : nationale, régionale et locale (documents de planification et documents d'urbanisme, chartes de parcs naturels régionaux, etc.).

Par exemple, à l'échelle régionale, en 2016 (première « génération » des trames vertes et bleues), les 21 régions métropolitaines avaient identifié 15,7 millions d'hectares de réservoirs de biodiversité (soit 29 % du territoire continental français) et 50 717 km de corridors linéaires, à préserver ou à restaurer (Billon et Sordello, 2017).

Au niveau plus local, la mise en œuvre de la trame verte et bleue se traduit concrètement par des actions de terrain pour restaurer les continuités écologiques, à l'initiative des collectivités, des associations, des entreprises et même des particuliers. Certaines actions sont typiques, comme la création de passages à faune pour le franchissement sécurisé des infrastructures de transport ou l'effacement d'obstacles à l'écoulement. Derrière ces actions phares, une multitude de mesures plus ou moins ciblées sur la trame verte et bleue contribuent en réalité au rétablissement des continuités écologiques (ex. : plantation de haies, réouverture de cours d'eau, gestion des emprises d'infrastructures).

## LES LIMITES DES TRAMES ÉCOLOGIQUES ACTUELLES

Les réseaux écologiques reposent sur une base théorique simple : préserver ou restaurer les habitats et leur connectivité. En outre, les approches pour caractériser les réservoirs et les corridors, puis pour les gérer, sont laissées totalement libres sur le plan juridique, l'État n'ayant imposé aucune méthode particulière aux collectivités et aux acteurs opérationnels. De plus, la notion de « continuité écologique », telle qu'elle est amenée par le Code de l'environnement, apparaît très inclusive : il peut donc en soi s'agir de continuités écologiques diurnes, nocturnes, sonores, olfactives, souterraines, aériennes, etc.

Cette grande flexibilité des concepts et des outils offre les meilleures chances pour concevoir des réseaux écologiques

« exhaustifs » au regard de la complexité du vivant, prenant en compte différents types de milieux et de perturbations anthropiques. Pourtant, dans les faits, plusieurs dimensions vitales pour le fonctionnement de la biodiversité, et en particulier la dimension sensorielle, semblent être largement ignorées.

Cette lacune concerne à la fois :

– le diagnostic, et notamment des pressions anthropiques. Pour identifier les réseaux écologiques, on commence par faire un diagnostic sur le territoire concerné pour évaluer l'état à la fois de la biodiversité et des pressions qui pèsent sur elle. Ces diagnostics passent ainsi en revue l'urbanisme, les infrastructures de transport ou les obstacles sur les cours d'eau. Mais les pressions sensorielles sont rarement considérées comme des menaces au fonctionnement des continuités écologiques ;

– la méthode d'identification. Sur la base du diagnostic, les noyaux et les corridors du réseau écologique sont identifiés. Très souvent, des espèces interviennent dans ce processus. L'idée est simple et pertinente : se mettre à la place des espèces pour évaluer leur capacité à relier effectivement deux noyaux entre eux au regard des contraintes paysagères. Malheureusement, seules les préférences d'habitats sont généralement prises en compte ici. Par exemple, pour identifier les corridors potentiels d'une espèce forestière, on recensera les chemins de milieux boisés suffisamment contigus ou proches entre deux noyaux. Là encore, ni les capacités sensorielles des espèces ni la qualité sensorielle des habitats ne sont généralement considérées. Or, se mettre à la place de l'animal implique de tenir compte des facteurs qui influencent ces choix. Comme vu au chapitre 2, ces choix sont directement guidés par la perception sensorielle, qui joue un grand rôle dans la navigation et le choix des habitats. Si ces chemins interfèrent avec des pollutions sensorielles, ils seront donc probablement inutilisables dans les faits, bien que structurellement identifiables sur une carte des végétations ;

– les mesures de gestion pour la mise en œuvre de la trame. La plupart des actions instaurées dans le cadre des politiques de trames écologiques interviennent concrètement sur le milieu, qu'il s'agisse de génie écologique, d'arasement de barrages, de construction de passages à faune, ou encore de replantation de

haies. La prise en compte de toutes les dimensions, y compris sensorielles, impliquerait d'implémenter des actions de gestion de l'éclairage nocturne ainsi que de réduction ou d'amélioration des activités bruyantes ou émettrices de molécules odorantes.

Les trames écologiques ont fait leurs preuves pour considérer les phénomènes de disparition et de fragmentation des habitats à l'échelle d'un territoire, dans le monde et notamment en France. Par conséquent, la lumière, le bruit et les odeurs ayant eux aussi des impacts paysagers, il paraît logique et pertinent que les trames écologiques se renforcent pour élargir leur spectre et prendre en charge ces pollutions sensorielles. Il en va de leur efficacité et, quelque part, de leur « crédibilité » : en tant qu'approches globalisantes, elles ne peuvent continuer à ignorer tout un pan du fonctionnement du vivant.

## TRAMES NOIRES, BLANCHES ET OLFACTIVES

Une évolution des trames écologiques paraît donc nécessaire pour qu'elles intègrent la perception sensorielle, en particulier visuelle, sonore et olfactive, et les pollutions anthropiques associées.

Ce mouvement est déjà à l'œuvre depuis quelques années en France, avec l'émergence de la « trame noire », destinée à prendre en compte la pollution lumineuse dans la trame verte et bleue. La trame noire peut être définie comme « un ensemble de réservoirs de biodiversité connectés par des corridors écologiques pour différents milieux (sous-trames), dont l'identification tient compte d'un niveau d'obscurité nocturne suffisant pour la biodiversité ». L'Office français de la biodiversité a réalisé un guide, publié en 2021, pour poser cette définition, préciser les concepts et donner des outils pour sa mise en œuvre (Sordello *et al.*, 2021).

La trame noire est désormais en plein essor, avec plusieurs dizaines de collectivités à avoir identifié ce réseau sur leur territoire en y associant des objectifs de préservation et de restauration (parmi les premières collectivités à s'être lancées : Lille, Douai, Nantes, Limoges, les parcs naturels régionaux du Massif central, les parcs nationaux et, en premier lieu, celui des Pyrénées). Pour amplifier cette dynamique, la Stratégie nationale pour la

biodiversité prévoit désormais à l'horizon 2030 de « rendre la mise en place de trames noires aussi systématique que celles des trames vertes et bleues dans les stratégies territoriales ».

La trame noire est également promue à l'international (Sordello *et al.*, 2022). Elle est inscrite dans une des motions votées au Congrès mondial de la nature en France en 2021, qui recommande « que les autorités identifient, préservent et restaurent les infrastructures naturellement sombres (réseaux écologiques formés de zones centrales et de corridors, caractérisés par un degré naturel d'obscurité nocturne et par sa périodicité) afin de faciliter le fonctionnement de milieux nocturnes sains, riches en espèces ». Dans un rapport publié en 2023, la Commission européenne encourage également l'extension des infrastructures vertes (l'équivalent des trames vertes et bleues à l'échelle européenne) à l'environnement nocturne (European Commission, 2023).

S'inspirant de ce déploiement, un mouvement plus large est maintenant nécessaire pour inclure les sons et les odeurs. Actuellement, la prise en compte des odeurs anthropiques dans les continuités écologiques est totalement inexistante. L'intégration de la pollution sonore a fait l'objet d'une première initiative, sous l'appellation « trame blanche », menée par le Parc naturel régional du golfe du Morbihan en 2018. Un projet est également en cours sur la métropole européenne de Lille. Mais c'est pour le moment le concept de « zone calme » ou de « zone de quiétude » qui suscite davantage d'intérêt auprès des gestionnaires d'espaces naturels. L'idée est de préserver certains secteurs du dérangement acoustique par un système de signalétique préventive vis-à-vis des usagers de la nature, voire des zones où la fréquentation humaine est interdite. Par exemple, dans le Parc naturel régional des Ballons des Vosges, divers sites (Natura 2000, réserves naturelles, réserves biologiques) ont été identifiés comme des zones de quiétude où des restrictions s'appliquent aux activités humaines bruyantes. Depuis 2014 déjà, la Commission européenne recommande les zones de quiétude pour garantir la tranquillité de la faune. Cette approche constitue ainsi une première démarche spatialisée de prise en compte de la pollution sonore sur les écosystèmes, mais sans inclure à ce stade la notion de réseau écologique (connectivité).

Cette diversification des problématiques à prendre en charge dans les trames écologiques plaide pour le développement de projets de « trames multidimensionnelles ». L'invitation est de considérer les pressions humaines qui s'exercent sur les continuités écologiques — physiques comme sensorielles — au sein d'un même projet de trames sur un territoire donné (Sordello *et al.*, 2025a). Dans le même temps, les trames écologiques élargissent également les compartiments qu'elles considèrent : nous voyons en effet émerger l'idée d'une trame aérienne — pour la prise en compte spécifique des obstacles aux espèces volantes (ex. : éoliennes, aéronefs, lignes électriques) — et d'une trame brune — pour prêter attention plus particulièrement à la faune du sol. Il existe ainsi une dynamique très positive — dans laquelle la France est pionnière — de consolidation des trames écologiques, pour qu'elles englobent les besoins des espèces et les pressions anthropiques. Cette évolution déjà amorcée reste néanmoins un défi à relever.

## UN CHANTIER INTERDISCIPLINAIRE

Prendre en compte la dimension sensorielle dans les trames écologiques implique de faire bouger les lignes dans des domaines très variés. Notamment, un certain nombre de termes et de concepts associés — comme la notion d'obstacle, d'habitat, de paysage — nécessiteraient d'être complétés ou revisités avec le prisme de la perception sensorielle. Par exemple, comme détaillé au chapitre 2, la définition du paysage telle qu'elle est actuellement posée dans la Convention européenne de Florence mériterait d'être moins anthropocentrique.

Par ailleurs, des connaissances et des données sont nécessaires, qui ne sont pas systématiquement accessibles pour l'instant (seuils de sensibilités, espèces les plus sensibles, données de pressions sensorielles, etc.). Cela sous-entend également de revoir notre manière d'appréhender l'aménagement du territoire, dans nos politiques publiques et dans notre corpus juridique. Ces limites actuelles sont une invitation pour les sphères scientifique, politique, juridique, et suggèrent un débat interdisciplinaire.



## Comblent les connaissances lacunaires

La prise en compte des pressions sensorielles dans la conservation de la nature, et notamment dans les trames écologiques, sous-entend d'avoir une bonne connaissance de ces pressions. Pour ce faire, le développement d'un réseau national de surveillance de ces pollutions serait nécessaire.

À ce jour, comme nous l'avons vu, il existe un indicateur national de pollution lumineuse qui donne uniquement un aperçu partiel de la situation (lumière perçue par satellite, en cœur de nuit, par temps clair, etc.). Le suivi et la cartographie de la pollution sonore restent également très parcellaires. Quant à la pollution olfactive, tout est à construire. Si la mesure d'une pollution olfactive n'a que peu de sens (eu égard aux limites décrites sur la notion d'odeur), il serait possible d'estimer le « potentiel » de nuisance olfactive d'un paysage à partir des concentrations en certaines molécules de ROS ou de COV dans l'atmosphère. Par ailleurs, nous n'avons pas encore décrit les paysages odorants naturels. Pourtant, il semble qu'il serait plausible de les cartographier en croisant les cartographies des végétations et les émissions volatiles connues chez les végétaux.

Afin d'évaluer le niveau de pollution, et donc de menace pour les écosystèmes, il est nécessaire de disposer de connaissances sur les seuils d'impact. Or ces impacts, et plus encore les seuils de bascule, restent largement inconnus. Pour les odeurs par exemple, seuls les insectes sont (partiellement) documentés. En réalité, nous ne connaissons même pas encore de façon exhaustive toute la palette des facultés olfactives du règne animal. Il existe donc un fort besoin de recherche, avec des compétences croisées en écologie, biologie, éthologie, neurosciences, écophysiologie, pour mieux décrire les effets des pollutions sensorielles.

Il n'est pour autant pas nécessaire de disposer d'une connaissance approfondie pour mettre en œuvre des actions. La bonne description des phénomènes pour quelques espèces représentatives de cortèges plus larges peut suffire. Mais, là encore, l'identification de ce type d'espèces « indicatrices » reste à mener, y compris pour la lumière artificielle. Ce travail de sélection d'espèces « modèles » pour les différentes sous-trames serait grandement utile pour la définition des trames écologiques sensorielles.

Le règlement européen récemment adopté sur la restauration de la nature prévoit de restaurer les écosystèmes en Europe. Notamment, les États membres devront remettre en bon état d'ici 2030 au moins 30 % des habitats actuellement en mauvais état, puis 60 % d'ici 2040 et 90 % d'ici 2050. De fait, cette restauration est à envisager par rapport à un état de référence. Mais cette notion d'état de référence est toujours un casse-tête en écologie de la conservation. Pour les paysages et les trames sensorielles, la question se pose donc aussi. Qu'est-ce qu'un paysage nocturne en bon état ? Qu'est-ce qu'une continuité écologique olfactive dégradée ? Qu'est-ce que le bon fonctionnement sonore d'un écosystème ?

Nous voyons bien qu'un champ important de questions s'ouvre à l'interface entre recherche et politique.

#### Faire évoluer notre conception de l'artificialisation reprise par le droit

Les trames écologiques ne sont pas des outils de planification « coercitifs ». Elles trouvent leur opérationnalité à l'échelle locale au travers des documents d'urbanisme et de planification, par exemple le plan local d'urbanisme (PLU) ou le schéma de cohérence territoriale (SCoT). Or ces documents ont pour objectif de programmer et d'organiser l'occupation du sol sur un territoire donné (ex. : zones à urbaniser, zones naturelles). Ils ne sont donc pas prévus pour inclure des perturbations intangibles comme les pollutions sensorielles, et encore moins lorsque celles-ci sont liées à une temporalité (cycle jour-nuit par exemple). L'élargissement aux autres trames sensorielles questionne la nécessité d'un nouveau pilotage juridique des trames en général, qui doit dépasser la dimension de l'urbanisme et de l'occupation du sol pour aller vers une notion plus large d'empreinte écologique.

Il convient de faire évoluer notre manière d'appréhender l'artificialisation des milieux naturels. Celle-ci repose pour l'instant beaucoup sur l'artificialisation du sol : le sol est-il imperméabilisé ou non ? Cette conception a été réaffirmée récemment à travers la politique « zéro artificialisation nette » (ZAN), initiée par la loi Climat et Résilience et destinée à freiner la consommation



des espaces naturels, agricoles et forestiers. Or les textes qui précisent les modalités du ZAN définissent très clairement l'artificialisation (décret n° 2023-1096 du 27 novembre 2023 relatif à l'évaluation et au suivi de l'artificialisation des sols) comme « l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol » (article L. 101-2-1 du Code de l'urbanisme). Au sein des documents de planification et d'urbanisme, les surfaces à considérer comme artificialisées sont donc celles « dont les sols sont soit imperméabilisés en raison du bâti ou d'un revêtement, soit stabilisés et compactés, soit constitués de matériaux composites ». Nous voyons bien qu'avec cette approche, les pollutions sensorielles ne sont pas considérées comme une forme d'artificialisation. Pourtant, comme nous l'avons vu, l'artificialisation d'une route ne se limite pas à sa surface bitumée ; ses émissions sonores, lumineuses, olfactives artificialisent les milieux adjacents.

En résumé, nous touchons ici à un point complexe, aussi bien juridique que « philosophique », lié à la conception même de notre empreinte écologique, essentiellement matérialiste pour l'instant. Notre approche est relativement binaire : un espace est soit aménagé, donc occupé au sol par des structures physiques, soit naturel, agricole ou forestier. La perte de fonctionnalité par altération de la perception sensorielle, y compris dans des espaces dits « naturels », n'entre pas dans ce cadre. Il y a donc bien un champ d'investigation pour penser de nouveaux outils, documents, leviers, procédures. En ce sens, une réflexion sur la transposabilité des trames sensorielles au niveau territorial devrait être engagée.



## Conclusion

Cet ouvrage a la volonté de rappeler que le monde qui nous entoure n'est pas que matériel, et que la perception sensorielle — notamment à travers la vision, l'ouïe et l'odorat — est même l'unique moyen pour les êtres vivants d'interagir entre eux et avec leur environnement afin de se repérer, d'éviter des dangers, de trouver un partenaire ou des habitats favorables. La perception sensorielle est un très vaste sujet que cet ouvrage ne peut évidemment pas traiter de façon exhaustive. L'objectif est de donner des clés pour en comprendre les grands mécanismes, souligner son rôle incontournable dans le fonctionnement des écosystèmes et créer un lien, pour le moment inexploré, avec l'échelle du paysage. Il y aurait encore tellement à dire, en élargissant aux milieux aquatiques et marins ou même aux végétaux, eux aussi capables de capter la lumière, les odeurs et même les vibrations. Depuis peu, des études suggèrent que les plantes participent elles aussi à la biophonie de manière passive, voire active ! D'autres stimulus sensoriels, comme les champs électromagnétiques, contribuent également à ce vaste réseau d'échanges d'information entre les vivants et leur environnement.

En s'éveillant à cette dimension sensorielle, l'évidence apparaît alors : nos diverses activités et notre manière d'aménager l'espace sont susceptibles de la perturber autant qu'elle perturbe le monde physique. Car nous réalisons tout à coup que nos infrastructures émettent d'innombrables sons, odeurs et lumières nocturnes. L'augmentation de la part artificielle des paysages sensoriels sur la planète est une lame de fond qui passe facilement inaperçue pour des esprits non informés. Par exemple, il est frappant de constater que de nombreuses personnes s'émerveillent devant la myriade de lumières artificielles nocturnes que font apparaître les images satellites de la Terre la nuit, témoins de la grandeur de notre civilisation, sans avoir à l'esprit le bouleversement écologique qu'illustre cette signature anthropique.



Pourtant, la recherche en écologie s'intéresse de plus en plus à ce problème. En particulier, les effets de la lumière artificielle nocturne sont documentés par un volume de connaissances toujours plus important ; de même pour les bruits anthropiques. Cette littérature démontre des effets néfastes que cet ouvrage a souhaité résumer pour en décrire les grands principes et la diversité aux différents niveaux de la biodiversité afin d'amener le lecteur à un constat simple : nous ne réussirons pas à stopper l'érosion de la biodiversité si nous ne nous intéressons qu'à la dimension physique des habitats naturels et des pressions anthropiques. À quoi bon restaurer des prairies pour les pollinisateurs si des polluants olfactifs les empêchent de les détecter ? À quoi sert-il de replanter des haies pour les chauves-souris si ces haies éclairées en bordure de village sont des barrières répulsives plutôt que des corridors ? Pourquoi construire des passages à faune pour les amphibiens si leur communication acoustique de part et d'autre de la route reste brouillée par le bruit du trafic ?

Cet ouvrage plaide ainsi pour que les pollutions sensorielles soient mieux reconnues parmi les facteurs d'érosion de la biodiversité et mieux prises en compte dans toutes les sphères possibles (ex. : politiques publiques, actions citoyennes, planification écologique, gestion des collectivités). Il s'agit avant tout de changer de point de vue en réalisant que divers objets que nous manipulons régulièrement en écologie doivent aussi se lire avec ce prisme sensoriel : qu'est-ce que l'habitat d'une espèce ? Que veut dire artificialiser ? Comment un paysage est-il perçu ? Qu'est-ce qu'une continuité écologique ? Qu'est-ce qu'une pollution ? Dans tous ces sujets, la dimension physique et la dimension sensorielle sont intimement liées, dessinant les deux versants de notre monde.

Cette prise en compte des pollutions sensorielles est un vrai défi, car la protection de la nature, l'urbanisme ou encore le droit se sont construits essentiellement en lien avec la dimension physique de notre monde. Ainsi, nous faisons face à un certain « impensé » technique, politique et sociétal, qui nécessite une remise en cause profonde et devra probablement aboutir à la création de nouvelles logiques de pensée, de nouveaux outils et documents, de nouvelles règles. Ce livre invite donc à engager

un débat transdisciplinaire pour que la perception sensorielle soit davantage considérée, pour que nos actions en faveur de la biodiversité ne se limitent pas à la partie tangible du monde. Certes, la pollution lumineuse bénéficie déjà de nombreuses mesures, y compris réglementaires, d'une attention scientifique et d'un combat associatif de longue date en France. Mais ce sujet reste encore abordé isolément, comme un problème d'alternance jour-nuit et donc de perturbation de la perception temporelle. Pour celles et ceux qui sont déjà familiers de la pollution lumineuse ou de la pollution sonore, cet ouvrage souhaite ainsi les amener à revisiter ces sujets en les repositionnant dans un problème plus vaste : les pollutions sensorielles.

Ce n'est que récemment que cette nouvelle famille de polluants a été clairement nommée. Le manque de connaissances scientifiques reste donc à combler, ce qui appelle à davantage de recherche pour mieux connaître les mécanismes de la perception sensorielle et les effets de nos émissions, en particulier les odeurs. Pouvoir adaptatif, variabilité individuelle, dose/seuil de toxicité, résilience et réversibilités sont autant de lacunes qui nécessitent davantage d'études. Des recherches pluridisciplinaires sont indispensables, y compris au sein des sciences du vivant, pour mieux marier notamment écologie sensorielle, écologie du paysage, éthologie, neurobiologie, écophysiologie.

Toutefois, il est trivial de rappeler que nous ne saurons jamais tout. De plus, investiguer la perception sensorielle implique de se mettre « à la place de » l'animal pour mieux comprendre ce qu'il perçoit, ce qui est par définition impossible. La cognition, phénomène très complexe, et les émotions ou les sensations, phénomènes très intimes, ne sont pas très loin lorsque l'on parle de perception sensorielle. Toute transposition hâtive à travers le prisme des capacités humaines est donc vaine. Au-delà même des différences entre espèces, nous pouvons nous attendre à une forte variabilité individuelle, et donc à une grande part d'imprévisibilité dans les réactions du fait, entre autres, de la sensibilité de chaque individu et de son expérience. Les mécanismes de perception sensorielle, et les impacts des émissions artificielles qui en découlent, sont donc par nature difficiles à appréhender. Pour autant, il reste nécessaire de continuer à

les étudier pour s'approcher au mieux de la « moins mauvaise » compréhension possible.

Ceci étant, il y a urgence à agir dès maintenant. La biodiversité et les paysages sensoriels sont déjà très détériorés sur la planète. À titre d'exemple, rappelons que 64 % des invertébrés — parmi lesquels on classe les insectes — sont actifs la nuit et sont donc exposés aux éclairages artificiels. En outre, le bénéfice de paysages sensoriels peu anthropisés est reconnu pour le bien-être et la santé humaine : notons que, selon l'Agence européenne pour l'environnement (EEA, 2020), 6,5 millions d'Européens souffrent de problèmes chroniques de sommeil à cause du bruit. Il faut donc agir vite, humblement, avec notre niveau de connaissances, en actionnant les leviers « sans regret ». Face à cette complexité et à cette richesse du vivant, et devant le constat que des impacts toujours plus nombreux de nos activités sont mis en évidence par la science, il conviendrait, par précaution, de rechercher avant tout une certaine sobriété dans notre manière d'agir et d'occuper l'espace, car la connaissance ne sera jamais totale et en quelque sorte toujours en retard. Cette sobriété que l'on accole souvent à la consommation énergétique ou à la consommation de l'espace devrait aussi concerner notre empreinte écologique sensorielle.

Dans cette meilleure prise en compte des pollutions sensorielles, les trames écologiques peuvent jouer un rôle important. En France, les trames vertes et bleues ont déjà énormément contribué depuis presque vingt ans à mieux intégrer la biodiversité dans l'aménagement du territoire. Cette idée de préserver et de restaurer des réseaux de milieux naturels connectés est à la fois essentielle et ludique. Les trames permettent une réflexion spatialisée, à l'échelle des territoires, fondée sur la notion de continuités écologiques. Élargissons ces concepts pour que les trames vertes et bleues deviennent également noires, blanches et olfactives !



## Références bibliographiques

Altermatt F., Ebert D., 2016. Reduced flight-to-light behaviour of moth populations exposed to long-term urban light pollution. *Biology Letters*, 12, 20160111. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0111>

Barth F., Humphrey J., Wastl U., Halbritter J., Brittinger W., 1995. Dynamics of arthropod filiform hairs. III. Flow patterns related to air movement detection in a spider (*Cupiennius salei* KEYS.). *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 347(1322), 397-412. <https://doi.org/10.1098/rstb.1995.0032>

Billon L., Sordello R., 2017. Schémas régionaux de cohérence écologique : chiffres de synthèse à l'échelle nationale. Rapport du Service du patrimoine naturel, UMS PatriNat OFB-CNRS-MNHN, 20 p.

Bolliger J., Hennet T., Wermelinger B., Bösch R., Pazur R. *et al.*, 2020. Effects of traffic-regulated street lighting on nocturnal insect abundance and bat activity. *Basic and Applied Ecology*, 47, 44-56. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.06.003>

BruitParif, 2020. *Bruit et biodiversité*, 58 p. <https://www.bruitparif.fr/les-impacts-du-bruit-sur-la-biodiversite/>

Brumm H., 2013. *Animal Communication and Noise*, Springer Science & Business Media, 464 p.

Busson S., Bretaud F., 2020. Adapter l'éclairage aux enjeux de biodiversité du territoire. Fiche n° 1, AUBE, Cerema, 16 p.

Buxton R.T., McKenna M.F., Mennitt D., Fristrup K., Crooks K. *et al.*, 2017. Noise pollution is pervasive in US protected areas. *Science*, 356, 531-533. <https://doi.org/10.1126/science.aah4783>

Ceballos G., Ehrlich P.R., Dirzo R., 2017. Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 114, E6089-E6096. <https://doi.org/10/cbvk>

Commission européenne, 1996. La politique future de lutte contre le bruit. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:1996:0540:FIN:FR:PDF>

Conchou L., Lucas P., Meslin C., Proffit M., Staudt M. *et al.*, 2019. Insect odorscapes: from plant volatiles to natural olfactory scenes. *Frontiers in Physiology*, 10, 972. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00972>



Danchin É., Giraldeau L.-A., Cézilly F., 2021. *Écologie comportementale*, Éditions Dunod, 672 p.

David N.F., Henry T.J., Sprayberry J.D.H., 2022. Odor-pollution from fungicides disrupts learning and recognition of a common floral scent in bumblebees (*Bombus impatiens*). *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 765388. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.765388>

Dominoni D., Smit J.A.H., Visser M.E., Halfwerk W., 2020. Multisensory pollution: artificial light at night and anthropogenic noise have interactive effects on activity patterns of great tits (*Parus major*). *Environmental Pollution*, 256, 113314. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113314>

Dötterl S., Vater M., Rupp T., Held A., 2016. Ozone differentially affects perception of plant volatiles in western honey bees. *Journal of Chemical Ecology*, 42, 486-489. <https://doi.org/10.1007/s10886-016-0717-8>

Dufier J.L., Touitou Y., 2021. Pollution lumineuse et santé publique. Rapport 21-10, Académie nationale de médecine. <https://doi.org/10.1016/j.banm.2021.07.010>

Elgert C., Lehtonen T.K., Kaitala A., Candolin U., 2021. The duration of artificial light defines sexual signalling in the common glow-worm. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 75, 154. <https://doi.org/10.1007/s00265-021-03093-2>

European Commission, 2023. Science for Environment Policy Future Brief 28: Light Pollution. Report. [https://environment.ec.europa.eu/publications/future-brief-light-pollution-mitigation-measures-environmental-protection-issue-28\\_en](https://environment.ec.europa.eu/publications/future-brief-light-pollution-mitigation-measures-environmental-protection-issue-28_en)

EEA, 2020. Environmental noise in Europe. Publications Office, European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/environmental-noise-in-europe>

Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba C.C.M., Elvidge C.D. *et al.*, 2016. The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377>

Falcón J., Torriglia A., Attia D., Viénot F., Gronfier C. *et al.*, 2020. Exposure to artificial light at night and the consequences for flora, fauna, and ecosystems. *Frontiers in Neuroscience*, 14, 602796. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.602796>

Fontaine B., Moussy C., Carricaburu J.C., Dupuis J., Schmaltz L. *et al.*, 2020. Résultats 2019 des programmes participatifs de suivi des oiseaux communs. LPO-MNHN.

- Francis C.D., Barber J.R., 2013. A framework for understanding noise impacts on wildlife: an urgent conservation priority. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11, 305-313. <https://doi.org/10.1890/120183>
- Frings H., Frings M., 1966. Reactions of orb-weaving spiders (Argiopidae) to airborne sounds. *Ecology*, 47, 578-588. <https://doi.org/10.2307/1933935>
- Gaston K.J., Duffy J.P., Bennie J., 2015. Quantifying the erosion of natural darkness in the global protected area system: decline of darkness within protected areas. *Conservation Biology*, 29, 1132-1141. <https://doi.org/10.1111/cobi.12462>
- Girling R.D., Lusebrink I., Farthing E., Newman T.A., Poppy G.M., 2013. Diesel exhaust rapidly degrades floral odours used by honeybees. *Scientific Reports*, 3, 2779. <https://doi.org/10.1038/srep02779>
- Halfwerk W., Slabbekoorn H., 2015. Pollution going multimodal: the complex impact of the human-altered sensory environment on animal perception and performance. *Biology Letters*, 11, 20141051. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2014.1051>
- Hennigar B., Ethier J.P., Wilson D.R., 2019. Experimental traffic noise attracts birds during the breeding season. *Behavioral Ecology*, 30, 1591-1601. <https://doi.org/10.1093/beheco/arz123>
- Hölker F., Wolter C., Perkin E.K., Tockner K., 2010. Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in Ecology & Evolution*, 25, 681-682. <https://doi.org/10/bt66nc>
- Insee, 2018. Tableaux de l'économie française, p. 81. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3303460?sommaire=3353488>
- Jiang N.-J., Chang H., Weißflog J., Eberl F., Veit D. *et al.*, 2023. Ozone exposure disrupts insect sexual communication. *Nature Communications*, 14, 1186. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36534-9>
- Jurcak A.M., Moore P.A., 2014. Behavioral decisions in sensory landscapes: crayfish use chemical signals to make habitat use choices. *Journal of Crustacean Biology*, 34, 559-564. <https://doi.org/10.1163/1937240X-00002266>
- Knop E., Zoller L., Ryser R., Gerpe C., Hörler M. *et al.*, 2017. Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature*, 548, 206-209. <https://doi.org/10.1038/nature23288>
- Kyba C.C.M., Kuester T., Sánchez de Miguel A., Baugh K., Jechow A. *et al.*, 2017. Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. *Science Advances*, 3, e1701528. <https://doi.org/10/gcmzgz>



Lengagne T., 2008. Traffic noise affects communication behaviour in a breeding anuran, *Hyla arborea*. *Biological Conservation*, 141, 2023-2031. <https://doi.org/10/b3hpmw>

Liang J., Yang J., Xie H., Peng X., He X. *et al.*, 2019. Impact of external odor on self-grooming of lesser flat-headed bats, *Tylonycteris pachypus*. *Ecology and Evolution*, 9, 8113-8118. <https://doi.org/10.1002/ece3.5377>

Lurling M., Scheffer M., 2007. Info-disruption: pollution and the transfer of chemical information between organisms. *Trends in Ecology & Evolution*, 22, 374-379. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.04.002>

Mason J.T., McClure C.J.W., Barber J.R., 2016. Anthropogenic noise impairs owl hunting behavior. *Biological Conservation*, 199, 29-32. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.04.009>

Matthew D.A., Osinubi S.T., Ivande S.T., Iwajomo S.B., Ottosson U., 2024. Structural and acoustic properties of urbanized landscapes adversely affect bird communities in a tropical environment. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 12. <https://doi.org/10.3389/fevo.2024.1457049>

Musy M., Aggeri G., Aubry C., coord., 2026. *Réinventer la nature en ville. Regards scientifiques et témoignages d'acteurs*, Versailles, éditions Quæ, 288 p. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4249-8>

Nouaillas O., 2019. *Une rivière en résistance, la Brézentine : récit*, Éditions du Rouergue, 112 p.

ONB, 2019. La nature sous pression. Pourquoi la biodiversité disparaît? Bilan 2019 de l'Observatoire national de la biodiversité.

ONB, 2020. État de conservation des milieux humides naturels. NatureFrance. <http://naturefrance.fr/indicateurs/etat-de-conservation-des-milieux-humides-naturels>

Pijanowski B.C., Farina A., Gage S.H., Dumyahn S.L., Krause B.L., 2011. What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape Ecology*, 26, 1213-1232. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9600-8>

PNUE, 2022. Bruit, flammes et décalages. Questions émergentes d'ordre environnemental. Rapport Frontières, Programme des Nations unies pour l'environnement, Nairobi.

Reculin S., 2017. «Le règne de la nuit désormais va finir». L'invention et la diffusion de l'éclairage public dans le royaume de France (1697-1789). Thèse, université Charles-de-Gaulle – Lille-III. <https://theses.hal.science/tel-01915183v1>

- Renou M., Anton S., 2020. Insect olfactory communication in a complex and changing world. *Current Opinion in Insect Science*, 42, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2020.04.004>
- Renou M., Sordello R., Reyjol Y., 2021. La biologie de la conservation doit-elle prendre en compte les paysages odorants? *Sciences, Eaux et Territoires*. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2021.HS.03>
- Roca I.T., Desrochers L., Giacomazzo M., Bertolo A., Bolduc P. *et al.*, 2016. Shifting song frequencies in response to anthropogenic noise: a meta-analysis on birds and anurans. *Behavioral Ecology*, 27, 1269-1274. <https://doi.org/10.1093/beheco/arw060>
- Rosell C., Seiler A., Chretien L., Guinard E., Hlavac V. *et al.*, 2023. Biodiversity and infrastructure. Section 5.4. *In: A Handbook for Action*, IENE-Infrastructure and Ecology Network Europe-BISON Project.
- Sánchez de Miguel A., Bennie J., Rosenfeld E., Dzurjak S., Gaston K.J., 2021. First estimation of global trends in nocturnal power emissions reveals acceleration of light pollution. *Remote Sensing*, 13, 3311. <https://doi.org/10.3390/rs13163311>
- Schafer M.R., 1994. *The Soundscape: Our Sonic Environment and the Tuning of the World*, Rochester, Destiny Books.
- Schafer M.R., Gleize S., 1979. *Le paysage sonore*, Paris, J.-C. Lattès.
- Shamble P.S., Menda G., Golden J.R., Nitzany E.I., Walden K. *et al.*, 2016. Airborne acoustic perception by a jumping spider. *Current Biology*, 26, 2913-2920. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.08.041>
- Sherwood L., Klandorf H., Yancey P., 2016. *Physiologie animale*, Éditions De Boeck Supérieur, 904 p.
- Slabbekoorn H., Dooling R.J., Popper A.N., Fay R.R. (eds), 2018. *Effects of Anthropogenic Noise on Animals*, New York, Acoustical Society of America, 327 p.
- Sordello R., 2017a. Pollution lumineuse : longueurs d'ondes impactantes pour la biodiversité. Exploitation de la synthèse bibliographique de Musters *et al.* (2009). UMS Patrinat OFB-CNRS-MNHN. <https://bit.ly/33vGd3y>
- Sordello R., 2017b. Les conséquences de la lumière artificielle nocturne sur les déplacements de la faune et la fragmentation des habitats : une revue. *Bulletin de la Société des naturalistes luxembourgeois*, 119, 39-54. [http://www.accac.eu/L\\_environnement/Pollution-lumineuse/SNL\\_2017\\_119\\_039\\_054.pdf](http://www.accac.eu/L_environnement/Pollution-lumineuse/SNL_2017_119_039_054.pdf)



Sordello R., 2017c. Pollution lumineuse et trame verte et bleue : vers une trame noire en France? *Territoire en mouvement, revue de géographie et aménagement*, 35. <http://journals.openedition.org/tem/4381>

Sordello R., 2024. Écologie du paysage et écologie sensorielle : prendre en compte les pollutions lumineuses, sonores et olfactives dans les trames écologiques. De la connaissance à l'action. Thèse, Muséum national d'histoire naturelle. <https://hal.science/tel-04645145>

Sordello R., Paquier F., Daloz A., 2021. *Trame noire, méthodologie d'élaboration et outils pour sa mise en œuvre*, Office français de la biodiversité, coll. Comprendre pour agir, 112 p. <https://professionnels.ofb.fr/fr/doc-comprendre-agir/trame-noire-methodes-delaboration-outils-mise-en-oeuvre>

Sordello R., Busson S., Cornuau J.H., Deverchère P., Faure B. *et al.*, 2022. A plea for a worldwide development of dark infrastructure for biodiversity: practical examples and ways to go forward. *Landscape and Urban Planning*, 219, 104332. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104332>

Sordello R., Cornuau J., Coulon A., Paquier F., Reyjol Y. *et al.*, 2025a. Manifesto for multidimensional ecological networks: a perspective to better account for the complexity of habitat loss and fragmentation. *Landscape Ecology*, 40, 110. <https://doi.org/10.1007/s10980-025-02123-y>

Sordello R., Ouédraogo D.-Y., Chassoulier C., Aulagnier S., Coulon A. *et al.*, 2025b. Does artificial light interfere with the activity of nocturnal mammals? An experimental study using road underpasses. *Biological Conservation*, 302, 110960. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2024.110960>

Svechkina A., Portnov B.A., Trop T., 2020. The impact of artificial light at night on human and ecosystem health: a systematic literature review. *Landscape Ecology*, 35 (8), 1725-1742. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01053-1>

Testud G., Fauconnier C., Labarraque D., Lengagne T., Le Petitcorps Q. *et al.*, 2020. Acoustic enrichment in wildlife passages under railways improves their use by amphibians. *Global Ecology and Conservation*, 24, e01252. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01252>

Touzot M., Lefebure T., Lengagne T., Secondi J., Dumet A. *et al.*, 2021. Transcriptome-wide deregulation of gene expression by artificial light at night in tadpoles of common toads. *Science of the Total Environment*, 151734. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151734>

- Touzot M., Lengagne T., Secondi J., Desouhant E., Théry M. *et al.*, 2020. Artificial light at night alters the sexual behaviour and fertilisation success of the common toad. *Environmental Pollution*, 259, 113883. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113883>
- UICN, 2020. IUCN Red List 2017–2020 Report, Union internationale pour la conservation de la nature, 24 p. [https://nc.iucnredlist.org/redlist/resources/files/1630480997-IUCN\\_RED\\_LIST\\_QUADRENNIAL\\_REPORT\\_2017-2020.pdf](https://nc.iucnredlist.org/redlist/resources/files/1630480997-IUCN_RED_LIST_QUADRENNIAL_REPORT_2017-2020.pdf)
- Vanderplanck M., Lapeyre B., Brondani M., Opsommer M., Dufay M. *et al.*, 2021. Ozone pollution alters olfaction and behavior of pollinators. *Antioxydants*, 10 (5), 636. <https://doi.org/10.3390/antiox10050636>
- Van de Schoot E., Merckx T., Ebert D., Wesselingh R.A., Altermatt F. *et al.*, 2024. Evolutionary change in flight-to-light response in urban moths comes with changes in wing morphology. *Biology Letters*, 20, 20230486. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2023.0486>
- Van Grunsven R.H.A., Creemers R., Joosten K., Donners M., Veenendaal E.M., 2017. Behaviour of migrating toads under artificial lights differs from other phases of their life cycle. *Amphibia-Reptilia*, 38, 49-55. <https://doi.org/10.1163/15685381-00003081>
- Vignon V., Waczak S., 1999. Réhabilitation d'un passage faune sous infrastructures jumelées (TGV et autoroute) jusque-là non utilisé par les ongulés sauvages (cerf, chevreuil, sanglier). Le cas du passage de la Bâte (tronc commun des autoroutes A10/A11). In : *Actes des 3<sup>es</sup> Rencontres Routes et faune sauvage*, Strasbourg, 237-251. [https://www.tramevertetbleue.fr/sites/default/files/references\\_bibliographiques/vignon.\\_v.\\_1999.pdf](https://www.tramevertetbleue.fr/sites/default/files/references_bibliographiques/vignon._v._1999.pdf)
- Vowles A.S., Kemp P.S., 2021. Artificial light at night (ALAN) affects the downstream movement behaviour of the critically endangered European eel, *Anguilla anguilla*. *Environmental Pollution*, 274, 116585. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116585>
- World Health Organization, 1999. *Guidelines for Community Noise*. <https://www.who.int/publications-detail-redirect/a68672>
- WWF, 2022. Rapport planète vivante 2022. Pour un bilan «nature» positif, Almond R.E.A., Grooten M., Juffe Bignoli D., Petersen T. (eds), Fonds mondial pour la nature, Gland, Suisse.
- Zeale M.R.K., Stone E.L., Zeale E., Browne W.J., Harris S. *et al.*, 2018. Experimentally manipulating light spectra reveals the importance of dark corridors for commuting bats. *Global Change Biology*, 24, 5909-5918. <https://doi.org/10.1111/gcb.14462>

## Crédits iconographiques

Figure 9 : © Kristian, stock.adobe.com; © Lovely, stock.adobe.com;  
© morganimation, stock.adobe.com; © David, stock.adobe.com.

Illustration de couverture : Nora Maleplate

Édition : Juliette Blanchet

Infographies : Nora Maleplate et Hélène Bonnet, Studio 9

Couverture et mise en pages : Hélène Bonnet, Studio 9

Achévé d'imprimer en juin 2026 par

Isiprint - 93120 La Courneuve

Dépôt légal : juillet 2026

Imprimé en France





Les organismes interagissent entre eux et avec leur environnement *via* leurs sens. Or les infrastructures et les activités humaines émettent de la lumière artificielle la nuit, des bruits et des molécules volatiles susceptibles de dégrader et de fragmenter les paysages sensoriels, rendant les écosystèmes moins fonctionnels.

Alors que l'artificialisation des milieux naturels est identifiée comme l'une des premières causes d'érosion de la biodiversité, ces pollutions sensorielles restent pourtant une préoccupation mineure dans les politiques publiques.

Cet ouvrage replace tout d'abord la perception sensorielle au cœur du fonctionnement des écosystèmes et des paysages. Il présente ensuite l'impact des pollutions lumineuses, sonores et olfactives sur la faune et les écosystèmes, puis propose des solutions pour les limiter. Enfin, il invite à une meilleure prise en compte de ces enjeux dans la planification territoriale au travers des politiques de trames écologiques.

**Romain Sordello** est ingénieur et docteur en écologie à l'Office français de la biodiversité au sein de l'unité PatriNat (OFB-MNHN-CNRS-IRD). Il développe depuis 2009 une expertise scientifique dans le domaine de la biodiversité. Il a contribué à faire émerger la problématique de la pollution lumineuse en France et a soutenu une thèse sur les pollutions sensorielles au Muséum national d'histoire naturelle. Il a participé à la mise en œuvre de la politique de la trame verte et bleue puis au déploiement des trames noires.



éditions  
**Quæ**

Éditions CIRAD, Ifremer, INRAE  
[www.quae.com](http://www.quae.com)

18 €

ISBN : 978-2-7592-4199-6



ISSN : 2267-3032

Réf. : 03067