

BRUIT ET BIODIVERSITÉ

MARS 2020



BRUITPARIF

Remerciements

Bruitparif remercie très chaleureusement Laurent Hutinet pour sa très grande contribution à la rédaction de ce rapport ainsi qu'Élisabeth Devilard, docteur en biologie moléculaire et cellulaire, pour ses apports précieux en termes de physiologie (voir notamment l'annexe page 49) et Olivier Adam, professeur à l'Institut Jean Le Rond d'Alembert (Sorbonne Université/CNRS), spécialiste de la bioacoustique, pour toutes les précisions et explications apportées. Un grand merci également aux membres du Conseil scientifique de Bruitparif, notamment à Gilberte Tinguely, chercheuse, spécialiste du sommeil et des effets biologiques du bruit, pour leur relecture attentive de ce rapport.

SOMMAIRE

GLOSSAIRE	1
INTRODUCTION	5
PRÉAMBULE	7
La crise de la biodiversité	7
Le son et l'audition	8
Le bruit et la pollution sonore	10
PARTIE 1 : L'IMPACT DU BRUIT SUR LA BIODIVERSITÉ	13
La bioacoustique et l'éco-acoustique	14
Communication et comportement	15
Les effets physiologiques du bruit	16
Le milieu aquatique	17
<i>Introduction</i>	17
<i>Les mammifères aquatiques</i>	18
<i>Les poissons</i>	21
<i>Les invertébrés* marins</i>	22
<i>Le plancton</i>	22
Les milieux terrestres	23
<i>Introduction</i>	23
<i>Les mammifères terrestres</i>	24
<i>Les oiseaux</i>	26
<i>Les amphibiens* et les reptiles</i>	29
<i>Les insectes et les arachnides*</i>	30
<i>La flore terrestre</i>	31
PARTIE 2 : L'ATTÉNUATION DE LA POLLUTION SONORE PAR LA BIODIVERSITÉ	33
Introduction	34
L'impact sonore de la végétation terrestre	34
Éléments végétalisés en milieu urbain dense	36
Merlons végétalisés	38
Synthèse sur l'effet de la végétation	38
L'effet psychologique chez l'être humain	39
<i>Une étude sur la perception du bruit dans des lieux végétalisés</i>	39
<i>Les jardins sonores</i>	40

PARTIE 3 : ASPECTS RÉGLEMENTAIRES	41
Introduction	42
L'étude d'impact	43
Le réseau Natura 2000 et les espèces protégées	43
CONCLUSION	45
BIBLIOGRAPHIE	47
ANNEXE	49

GLOSSAIRE

Les termes suivis d'un astérisque (*) dans le texte de ce rapport font l'objet d'une définition dans le présent glossaire.

Abiotique

Qui ne dépend pas du monde vivant : le vent ou la marée sont ainsi des phénomènes abiotiques.

Amphibiens

Anciennement appelés batraciens, il s'agit d'animaux terrestres à quatre pattes qui se reproduisent généralement en déposant leurs œufs dans l'eau. Leurs larves aquatiques sont nommées têtards.

Anoures

Amphibiens* dont l'adulte est dépourvu de queue et qui peuvent vivre hors de l'eau : grenouilles, crapauds.

Apoptose

Processus par lequel les cellules vivantes déclenchent leur autodestruction en réponse à un signal donné.

Arachnides

Les arachnides sont des arthropodes* terrestres ou aquatiques souvent insectivores. Ils possèdent quatre paires de pattes et leurs yeux sont simples et non composés. Le taxon* comprend notamment les araignées, les scorpions et les acariens.

Arthropodes

Il s'agit d'un très vaste groupe d'animaux qui possèdent un corps segmenté. 80 % des espèces connues dans le règne animal et des eucaryotes* en relèvent : crustacés, arachnides*, insectes, etc.

Audiogramme

C'est un bilan qui relève les capacités auditives d'une espèce ou d'un individu donné en fonction des fréquences*.

Biofouling

Phénomène par lequel une surface est colonisée par des organismes vivants (bactéries, notamment).

Biomasse

Masse constituée par les organismes vivants, en opposition à celle du monde minéral.

Biome

Un biome est un ensemble d'écosystèmes* caractéristiques d'une région géographique, et qui est nommé à partir de la végétation et des espèces animales qui y prédominent : toundra, taïga, forêts tempérées, forêts tropicales, déserts secs, mangrove, etc.

Biosphère

Au niveau planétaire, l'ensemble des éléments appartenant au monde vivant, en opposition au monde minéral, qu'il soit solide, liquide ou gazeux.

Biotique

Qui relève du monde vivant, en opposition aux milieux et phénomènes abiotiques*.

Cellules ciliées

Les cellules ciliées sont des cellules sensorielles aptes à détecter les sons et présentes notamment chez les vertébrés*. Elles traduisent les sons en influx nerveux.

Céphalopodes

Classe de mollusques dont la tête est munie de tentacules, aussi nommés bras : poulpes, seiches, calmars, etc.

Cétacés

Mammifères marins vivant entièrement dans l'eau.

Chiroptères

Mammifères ailés et volants appelés couramment chauves-souris.

Chambre anéchoïque

Les parois d'une chambre anéchoïque absorbent les ondes sonores ou électromagnétiques dans des conditions de champ libre, sans écho. Ce dispositif est utile pour les mesures des ondes acoustiques en l'absence de composantes ayant subi une réverbération sur des parois. Une chambre semi-anéchoïque possède un plancher non recouvert d'isolant et qui peut donc être réfléchissant.

Circadien

Un rythme circadien est un rythme biologique d'une durée de 24 heures environ.

Corticostérone

Il s'agit d'une hormone commune à de nombreux vertébrés* (amphibiens, reptiles, rongeurs, humains et oiseaux) et qui est impliquée dans la régulation de l'énergie métabolique*, des réactions immunitaires et des réponses au stress*.

Diplopede

Classe d'arthropodes* possédant deux paires de pieds sur chacun de leurs segments. C'est le cas des chilopodes, couramment appelés « mille-pattes ».

Écosystème

C'est l'un des concepts clés de la science écologique. Il s'agit d'un système occupant une place précise dans l'espace et qui associe des éléments biotiques*

et abiotiques* : lac, forêt, littoral, etc. Outre d'autres phénomènes concourant à leur relative stabilité dans le temps, les chaînes trophiques* prennent place dans les écosystèmes : à leur point de départ se situent les producteurs de biomasse*, qui nourrissent les consommateurs (animaux, champignons). Les chaînes trophiques comportent plusieurs étages (super-consommateurs) et sont bouclées par les décomposeurs, qui font retourner la biomasse* à l'état minéral.

Écholocalisation

L'écholocalisation est pratiquée par un certain nombre de vertébrés* et consiste à envoyer des sons dans l'environnement pour localiser et le cas échéant identifier les éléments qui y sont présents. Elle est pratiquée chez les animaux comme certains chiroptères* et certains odontocètes*, et par l'espèce humaine à travers le sonar* ou les scanners utilisés en médecine pour réaliser des échographies.

Eucaryotes

Les eucaryotes sont des organismes dont les cellules possèdent un noyau et des organites.

Eutrophisation

Phénomène d'une trop grande concentration en nutriments (nitrates et phosphates) qui permet la prolifération d'algues et conduit à une baisse de la teneur en oxygène de l'eau en raison de la prolifération bactérienne induite. L'eutrophisation provoque notamment les marées vertes.

Hertz (Hz)

Le Hertz (Hz) est l'unité de la fréquence : il se définit par le nombre de cycles enregistrés en une seconde. L'oreille d'un jeune être humain perçoit les sons de 20 Hz à 20 kHz.

Invertébré

Désigne un animal qui ne possède pas de colonne vertébrale : les insectes, les crustacés, les mollusques sont des invertébrés.

Famille

En biologie, la famille désigne un taxon* qui regroupe les genres* possédant le plus de similitudes entre eux.

Fréquence

Voir Hertz.

Genre

En biologie, un genre regroupe différentes espèces ayant en commun plusieurs caractères similaires. Les genres se regroupent en familles* biologiques.

Harmoniques

Ce sont les sons secondaires produits par la multiplication de la fréquence* fondamentale d'un son. Leur répartition est à la base du timbre du son : les timbres des instruments de musique, mais aussi

des animaux ou des voix humaines, diffèrent entre eux et leur sont spécifiques.

Krill

Le krill est le nom générique de petites crevettes des eaux froides, de l'ordre des euphausiacés, dont se nourrissent en particulier certaines espèces de mysticètes*.

Métabolisme, métabolique

Le métabolisme est l'ensemble des réactions chimiques qui se déroulent à l'intérieur d'un être vivant pour lui permettre de se conserver et de se reproduire. Est dit métabolique ce qui relève du métabolisme.

Mysticètes

Ce sont des cétacés* souvent de grandes tailles et dotés de fanons. Ils se nourrissent d'organismes aquatiques de petite taille, comme le krill* et de petits poissons.

Niche écologique

La niche écologique est propre à chaque espèce et désigne les conditions abiotiques* et biotiques* qui sont favorables à sa conservation, à son développement et à sa reproduction. Les niches écologiques varient énormément selon les espèces, y compris au sein d'un même écosystème*.

Odontocètes

Cétacés dotés de dents, tels que dauphins, orques, cachalots. Ils se nourrissent principalement de calamars et de poissons.

Oscines

Ce terme désigne les passereaux (oiseaux qui se perchent) qui chantent.

Parasympathique

Le système nerveux autonome contrôle les activités involontaires des organes, des glandes et les vaisseaux sanguins. Le système nerveux parasympathique en fait partie et préside globalement aux phénomènes d'entretien et de réparation des tissus et organes. Une bonne activité parasympathique est donc essentielle pour le bon fonctionnement du métabolisme*.

Pectinidés

C'est une famille* de mollusques bivalves qui vivent sur le fond des milieux aquatiques.

Pinnipèdes

Les pinnipèdes forment une famille* de mammifères carnivores marins semi-aquatiques aux pattes en forme de nageoires : phoques, otaries, morses.

Pollinisation, pollinisateur, polliniser

Chez les plantes à fleurs, la pollinisation désigne le transport du pollen (provenant des organes de reproduction mâle, les étamines) vers les organes de

reproduction femelle (pistils), ce qui permet la reproduction sexuée de ces espèces. Les vecteurs de la pollinisation (pollinisateurs) diffèrent selon les espèces et les situations : vent, insectes et autres animaux terrestres.

Services écosystémiques

Les services écosystémiques désignent les bénéfices tirés par l'humanité des écosystèmes* : épuration de l'eau et de l'air, pollinisation* des cultures, fourniture de matériaux et d'énergie, etc.

Siréniens

Un ordre de mammifères herbivores vivant dans l'eau et qui comprend le Dugong ainsi que les espèces de lamantins.

Sonar

C'est un dispositif humain qui fait appel à l'émission et à la réception de signaux sonores pour détecter et localiser des objets situés dans l'eau.

Statocyste

C'est l'un des organes de l'équilibre sensible à la gravité chez certains invertébrés* et chez les plantes. Il permet aussi une certaine sensibilité aux sons, au moins chez un certain nombre d'invertébrés*.

Statolite ou statolithe

Désigne à la fois une cellule spécialisée dans la détection de la gravité chez les plantes et un grain minéral présent dans l'oreille interne des vertébrés* ou dans le statocyste* des invertébrés*.

Stress

En biologie, le stress désigne toutes les réactions d'un organisme donné aux pressions et contraintes de l'environnement.

Suboscine

Ce terme désigne les espèces de passereaux (oiseaux qui se perchent) qui ne chantent pas.

Syrinx

Organe de la vocalisation chez les oiseaux. Il se situe au fond de la trachée et possède selon les espèces un nombre variable de muscles stimulateurs, dont dépendent les possibilités de richesse du chant.

Tarse

Chez les oiseaux, ce terme désigne la patte, c'est-à-dire la partie écailleuse située entre la cuisse et le pied.

Taxon

Un taxon est un terme qui permet de regrouper des êtres vivants qui possèdent un certain nombre de caractères en commun : il peut notamment s'agir d'un ordre, d'une famille*, d'un genre* ou d'une espèce.

Télomère

Extrémité des chromosomes lors de la division cellulaire (séquences d'ADN non codantes). Ils raccourcissent naturellement au cours de la vie et une exposition au bruit peut accélérer ce raccourcissement.

Trames vertes et bleues

Document défini par la réglementation, notamment en France, et qui a pour but de favoriser la circulation des espèces dans les milieux terrestres et aquatiques et entre eux, à des échelles variées.

Trophique

Qui est relatif à la fonction d'alimentation. On parle notamment de réseaux trophiques dans les écosystèmes* pour désigner les espèces qui se nourrissent les unes des autres.

Ultrasons

Gamme de son trop aigus pour être perçus par l'audition humaine, donc approximativement d'une fréquence* supérieure à 20 kHz.

Vertébrés

Animaux qui ont la particularité de posséder un squelette interne muni d'une colonne vertébrale : les poissons osseux, les amphibiens*, les oiseaux, les mammifères et les reptiles.

Vessie natatoire

Organe présent chez les poissons osseux. Il peut se remplir de gaz et détermine la profondeur à laquelle nage l'individu. La vessie natatoire participe aussi dans un certain nombre de cas au sens de l'audition des poissons concernés.

Zinco

Substrat de culture artificiel fabriqué à partir de briques recyclées broyées et de matière organique.

Zooplankton

Désigne les animaux de petite taille qui vivent dans l'eau et qui se nourrissent d'autres espèces végétales ou animales. La diversité biologique du zooplankton est très élevée et les espèces considérées peuvent être d'une taille de quelques centièmes de millimètres à quelques centimètres. Les animaux qui composent le zooplankton peuvent être larvaires ou adultes.

INTRODUCTION

L'humanité est entrée dans une crise écologique globale qui se traduit par une vaste série de phénomènes de très grande ampleur. Le plus célèbre et le plus médiatisé d'entre eux est sans doute le changement climatique global, mais celui-ci est loin d'être le seul en cause. Selon le *Stockholm Resilience Center*, la crise écologique mondiale est en effet caractérisée par neuf dimensions cruciales : le changement climatique, l'érosion de la biodiversité, la perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore, les changements d'utilisation des sols, l'acidification des océans, l'utilisation mondiale de l'eau, l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, l'augmentation des aérosols dans l'atmosphère et l'introduction d'entités nouvelles dans la biosphère*.

Au quotidien, les manifestations de ces désordres globaux peuvent sembler discrètes, en particulier dans les pays industrialisés. Au registre des pollutions, le grand public pense le plus souvent spontanément à la pollution de l'air, mais il faut y ajouter notamment la pollution chimique des eaux et des sols, qui se traduisent chez la plupart des organismes vivants par la présence au sein même de leurs tissus de substances toxiques variées, y compris d'origine médicamenteuse.

Nous verrons ici que le bruit est lui aussi à l'origine d'une pollution non négligeable. Si la pollution sonore reste souvent négligée, c'est sans doute tout simplement parce qu'elle est impalpable et invisible, à une heure où le sens de la vue l'emporte sans aucun doute sur tous les autres. Pourtant, elle est vivement ressentie par les êtres humains, comme le documente régulièrement Bruitparif, et ses effets sont loin d'être négligeables sur la santé humaine selon l'Organisation mondiale de la santé : selon les courbes dose-réponse qu'elle propose, ce sont par exemple pour le cœur de l'Île-de-France près de 108 000 années de vie en bonne santé qui seraient ainsi perdues chaque année en raison du bruit des transports, soit près de onze mois de perte de vie en bonne santé en moyenne par habitant sur une vie entière.

La pollution sonore est vivement ressentie par la population et le législateur a par conséquent introduit au fil du temps un certain nombre de dispositions pour protéger la santé humaine des effets néfastes du bruit. La pollution sonore a augmenté depuis l'entrée de l'humanité dans l'ère industrielle, et en particulier depuis le XXe siècle, époque à laquelle les applications de l'industrie se sont généralisées : mines, chimie, électricité, manufactures et industrie, transports mécanisés.

Nous verrons au fil de ces pages qu'il ne fait aucun doute que la modification de l'environnement sonore fait partie des changements majeurs que l'humanité inflige à l'environnement et en particulier à la biodiversité.

Car si le bruit affecte les humains, il est de plus en plus clair que cette forme de nuisance concerne aussi les autres formes de vie. C'est particulièrement le cas pour les animaux : nous verrons ici que le bruit affecte la capacité des animaux à communiquer, capacité qui détermine toute une série de leurs comportements vitaux. Le bruit a en effet des conséquences directes sur les capacités de survie des animaux (voire de certaines plantes), en première approche en raison de son influence sur leurs aptitudes comportementales, mais aussi parce que le bruit affecte le bon fonctionnement de leur métabolisme*. Le bruit modifie donc négativement le comportement des animaux, l'état de santé des espèces et modifie l'équilibre des écosystèmes.

Dans ces conditions, il y a lieu de s'interroger sur le fait que la recherche scientifique s'intéresse globalement encore assez peu à l'influence du bruit sur la bonne santé des espèces vivantes, même si de premiers travaux de synthèse commencent à être publiés. Si l'attention de la recherche à l'impact du bruit sur les êtres humains montre un intérêt certain, les travaux consacrés à l'impact du bruit sur la faune et sur la flore sont relativement récents.

Notons tout d'abord que si la pollution sonore est peu étudiée par les biologistes et les écologues, c'est parce qu'il est souvent difficile de l'analyser spécifiquement : ainsi, une route peut avoir des effets de fragmentation de l'habitat, de perturbation visuelle, de mortalité routière, de pollution chimique, etc. Il est donc souvent très difficile d'estimer la force d'impact de la seule composante qu'est le bruit. Pourtant, un nombre croissant d'études permet de dresser un premier état des lieux, ce qui est l'objet de ce rapport d'étude.

Ce rapport commencera donc, en préambule, par caractériser rapidement l'état de la biodiversité, ainsi que la nature du bruit et de la pollution sonore. Il s'efforcera ensuite, dans une première partie, d'évoquer les principaux effets des impacts du bruit anthropique sur la biodiversité marine et terrestre, en s'appuyant pour cela sur les synthèses existantes et sur un certain nombre d'études et d'ouvrages dédiés à la question, après avoir présenté les disciplines scientifiques qui étudient les relations entre le monde vivant et la dimension du sonore (bioacoustique et éco-acoustique).

La deuxième partie de l'étude s'intéressera à l'influence de la biodiversité sur le bruit, et essentiellement aux avantages que la végétation peut apporter en termes de réduction des signaux sonores, mais aussi (en ce qui concerne notamment

l'espèce humaine) de contribution au confort acoustique. L'étude se terminera par une présentation des ressources réglementaires en termes de protection acoustique de la biodiversité.

PRÉAMBULE

LA CRISE DE LA BIODIVERSITÉ

La biodiversité se définit comme la diversité des formes du vivant, à la fois du point de vue des espèces, des génomes et des écosystèmes*. La notion est apparue dans les années 1980 pour répondre au développement de la crise du monde vivant et des fonctions qu'il porte vis-à-vis de l'humanité. La biodiversité se mesure principalement en termes de richesse (diversité des cortèges végétaux, microbiens, animaux, etc.) et d'abondance (nombre d'individus). Cette diversité biologique et écologique connaît actuellement une crise majeure qui se traduit par une chute de ces deux types d'indicateurs et par une perturbation du fonctionnement des écosystèmes*.

Le dernier rapport de l'IPBES (Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques*) date de mai 2019 et relève que dans la plupart des régions du monde, la grande majorité des indicateurs relatifs aux écosystèmes* et à la biodiversité montrent un déclin rapide. L'abondance moyenne des espèces autochtones a chuté d'au moins 20 % dans la plupart des grands biomes* terrestres (forêts tropicales, forêts tempérées, steppes, déserts, etc.) depuis 1900. Les populations sauvages de vertébrés* terrestres, d'eau douce et marins ont tendance à baisser depuis 50 ans et la tendance est aussi très mauvaise pour les insectes.

L'IPBES estime que 25 % des espèces sont menacées à l'échelle du globe en raison des activités humaines, soit environ un million d'espèces déjà menacées d'extinction durant les décennies à venir. Si la tendance actuelle se perpétue, l'augmentation du taux global d'espèces menacées d'extinction s'accroîtra alors qu'il est déjà supérieur à des dizaines voire à des centaines de fois à celui relevé durant les dix derniers millions d'années. La crise actuelle de la biodiversité est donc sans précédent à l'échelle humaine.

Actuellement, 75 % de la surface terrestre est altérée de façon significative, tout comme les deux tiers des océans, alors que plus de 85 % des zones humides ont disparu. La situation est particulièrement critique dans les zones tropicales et la moitié de la surface de corail vivant a disparu depuis 1870. En parallèle, les systèmes agricoles du monde entier ont tendance à se simplifier. Le nombre d'espèces et de variétés végétales cultivées a chuté, tout comme celles des

animaux d'élevage.

Il résulte de cette série de phénomènes une forte dégradation du fonctionnement des écosystèmes* naturels et agricoles, ce qui entraîne des désordres variés : perturbation du régime d'écoulement et de l'épuration des eaux, marées vertes, augmentation du risque d'incendies de forêt, eutrophisation*, perturbation des microclimats, recul de l'épuration de l'air, stagnation voire baisse de la fertilité agricole, recul de la pollinisation*, etc.

Sans même évoquer la fourniture de ressources naturelles à la base de la fabrication de bon nombre des médicaments, la plupart de ces fonctions sont irremplaçables pour l'humanité. Si le recul dramatique de la diversité des espèces présentes n'est pas le seul phénomène en cause pour la dégradation des écosystèmes*, elle n'en est pas moins une raison majeure du recul de leur bon fonctionnement. Il en résulte une dégradation très importante des apports de la nature aux modes de vie humains, que l'on nomme désormais services écosystémiques*. Ces services que la nature rend à l'humanité, dits encore services écologiques, sont généralement classés en quatre grands types :

- Les services d'approvisionnement, qui concernent les prélèvements directs dans les écosystèmes* : nourriture, combustibles, matériaux et médicaments.
- Les services de régulation, qui reposent sur le bon fonctionnement des écosystèmes* : régulation du climat, des inondations, pollinisation* ou encore diminution du risque de développement des organismes pathogènes.
- Les services socioculturels, qui ne sont pas de nature biologique, mais qui correspondent aux relations que l'espèce humaine entretient avec les espèces et les milieux au titre de son caractère culturel : aspects esthétiques, récréatifs, culturels et spirituels, etc.
- Les services de soutien, qui sous-tendent les autres types de services écosystémiques* : bon fonctionnement des grands cycles biochimiques et climatiques, production primaire de biomasse*, etc.

La crise actuelle de la biodiversité est d'une telle ampleur que l'on évoque souvent la sixième phase d'extinction majeure des espèces végétales et animales que serait en train de traverser notre planète. Cette crise de la biodiversité a de multiples causes : changement d'utilisation des terres, fractionnement et raréfaction des habitats,

urbanisation et développement des infrastructures de transport, imperméabilisation, pollutions chimiques, agriculture et sylviculture intensives, utilisation massive des pesticides, prélèvements anthropiques trop élevés, activités extractives et industrielles, rejet des déchets dans l'environnement. Le changement climatique exacerbe les effets de ces phénomènes sur la biodiversité. Tous ces changements globaux se sont intensifiés au cours des cinquante dernières années, à un rythme jamais connu au cours de l'histoire de l'humanité, en parallèle du doublement de la population humaine, passée de 3,7 milliards en 1970 à 7,8 milliards en 2020. Ces bouleversements fragilisent en retour grandement le sort des sociétés humaines.

LE SON ET L'AUDITION

À ce jour, l'IPBES ne retient pas le bruit parmi les phénomènes qui affectent principalement la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes*. Cette absence est certainement due à une certaine rareté de la recherche en la matière, bien qu'un certain nombre de chercheurs étudient depuis de nombreuses années l'impact de la pollution sonore sur les espèces et les milieux. Nous verrons au fil de ces pages qu'elle n'est sans aucun doute pas négligeable et qu'il est probable que son rôle soit révisé à la hausse à l'avenir.

Du point de vue physique, le bruit ne se distingue pas du son. En fait, la notion de bruit peut varier d'un individu à l'autre. Certains vont percevoir les émissions sonores d'oiseaux comme des chants doux évoquant la campagne et les vacances, d'autres vont les percevoir comme des bruits venant perturber leur tranquillité. De même, les émissions sonores des crevettes sont définies comme des bruits par les sous-marinières et comme des sons importants par les biologistes ! La notion de bruit, au-delà des facteurs acoustiques, dépend de notre culture, de notre éducation et de notre environnement.

Le son est une onde mécanique qui résulte de la vibration d'un élément physique et qui se propage dans un support, par exemple dans un milieu fluide (air, eau, etc.) ou solide (bois, métal...), mais également à travers les organismes vivants, sous la forme d'une succession de variations de pression. Le son ne peut pas se propager dans le vide.

De manière générale, le son peut être caractérisé par son niveau sonore (intensité des variations de pression), sa fréquence*, de grave à aiguë, mesurée en hertz* (Hz) et son timbre (répartition des harmoniques* de la fréquence* fondamentale).

Le niveau sonore s'exprime généralement en décibel (dB). C'est une grandeur sans dimension, un décibel

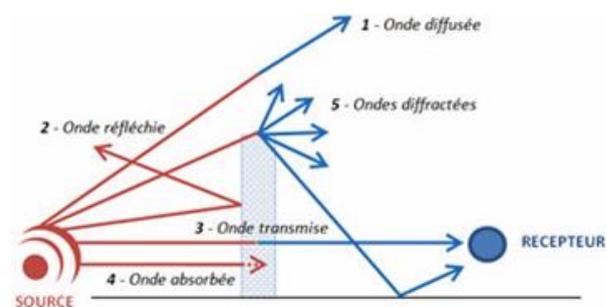
étant défini comme dix fois le logarithme décimal du rapport de puissance entre la pression acoustique et la valeur de référence qui correspond à un son pratiquement imperceptible pour les humains ($P_0 = 20$ micropascals).

La vitesse de propagation du son dépend de la nature du milieu dans lequel l'onde se propage mais également de la température.

La vitesse de propagation d'une onde acoustique, à 20 °C, est la suivante :

- dans l'air : 344 m/s, soit environ 1 240 km/h ;
- dans l'eau : 1 500 m/s, soit environ 5 400 km/h ;
- dans l'acier : 5 600 m/s, soit 20 160 km/h.

La propagation des ondes sonores dans l'atmosphère est un phénomène complexe qui peut être affecté par toute une série d'éléments comme par exemple la topographie du terrain, la nature du sol ou les caractéristiques atmosphériques.



Phénomènes intervenant dans la propagation du bruit

Quelques phénomènes physiques bien connus affectent plus ou moins fortement la propagation des ondes sonores.

C'est d'abord le cas du phénomène d'atténuation avec la distance. À l'image des ondulations qui se propagent à la surface de l'eau quand on y jette une pierre, l'énergie d'une onde acoustique en espace libre se répartit dans un volume qui augmente à mesure qu'elle s'éloigne de la source. La forme de la surface d'onde émise dépend du type de source. Pour une source ponctuelle omnidirectionnelle par exemple, l'onde émise est de nature sphérique. À mesure que l'onde s'éloigne de la source, l'énergie acoustique se répartit sur la surface d'une sphère de plus en plus grande. En conséquence, l'amplitude de l'onde diminue. Ce phénomène est appelé divergence géométrique.

La divergence géométrique pour une source ponctuelle provoque une atténuation de 6 décibels (dB) par doublement de distance. Pour une source linéique comme le trafic routier, la décroissance est de 3 dB par doublement de distance.

Le son fait aussi l'objet du phénomène de réflexion : les ondes sonores sont réfléchies par les divers obstacles qu'elles rencontrent, notamment par le sol qui peut parfois transmettre une onde sonore sur de

grandes distances. Lors de l'interaction avec un obstacle, une partie des ondes est réfléchiée par l'obstacle après avoir été modifiée par les caractéristiques de sa surface. La réflexion peut être totale sur une surface réfléchissante parfaitement lisse (béton lisse, par exemple), ou bien partielle sur une surface absorbante et/ou rugueuse. La partie réfléchiée peut interagir avec la partie non réfléchiée (onde directe) pour donner lieu à des phénomènes d'interférences.

Le son donne également lieu au phénomène de diffraction : lorsqu'une onde sonore rencontre une frontière présentant une discontinuité (arête d'un obstacle, trou...), elle va être affectée par le phénomène de diffraction. Ce phénomène se traduit par une réémission de l'onde incidente dans de nombreuses directions à partir de la discontinuité. Ce phénomène est très courant en acoustique extérieure et se produit par exemple en présence du sommet ou des bords d'un mur, d'un écran acoustique, des arêtes d'un bâtiment (murs, toiture...), d'irrégularités de terrain marquées (sommet d'un talus, butte, etc.).

Les effets atmosphériques jouent enfin un rôle : la composition chimique de l'air et ses propriétés physiques peuvent influencer sur l'onde acoustique au cours de sa propagation. On distingue traditionnellement les effets dus à l'absorption atmosphérique et les effets dus aux caractéristiques météorologiques de l'atmosphère (voir page 34). Le lecteur pourra par ailleurs prendre connaissance dans la suite de ce rapport de certaines des spécificités de la propagation du son en milieu aquatique (voir page 17).

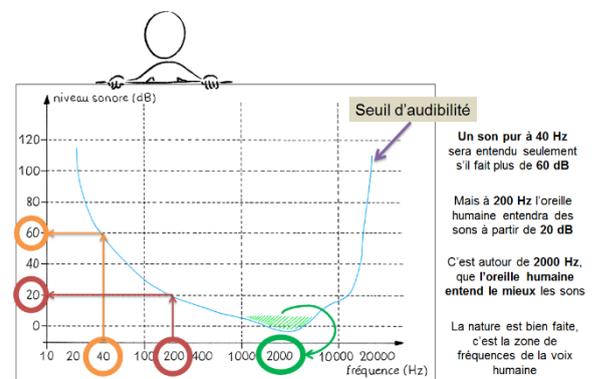
Au-delà de ces phénomènes physiques, le son est aussi défini par la perception qu'en tire son récepteur : on parlera alors d'un beau son, d'un son étrange ou encore d'un bruit.

De ce point de vue, il ne faut pas perdre de vue que les différentes espèces animales et les groupes d'espèces sont marqués par des capacités auditives qui diffèrent grandement. L'audition humaine n'est pas particulièrement mauvaise, mais elle est néanmoins supplantée par celle de nombreuses espèces, en particulier chez les mammifères, comme le souligne le tableau ci-dessous. Certains groupes ou espèces perçoivent des sons plus aigus et/ou plus graves que l'homme : c'est un point à prendre en compte dans l'évaluation des effets de la pollution sonore chez les animaux. Il faut aussi noter que les mammifères ont l'oreille la plus performante dans le règne animal (sur le plan du spectre mais également en ce qui concerne le seuil d'audition).

L'oreille humaine perçoit les sons dans une gamme de fréquences* qui va de 20 hertz* (très grave) à 20 000 hertz* (très aigu). En deçà de 20 Hz, règnent

les infrasons que l'oreille humaine ne peut percevoir, mais que nous pouvons ressentir, en particulier dans notre cage thoracique. Des études montrent qu'ils jouent un rôle fondamental dans la communication chez l'éléphant. Au-delà de 20 000 Hz, on parle d'ultrasons*, également réservés à d'autres oreilles que les nôtres, celles des chiens, des dauphins ou des chauves-souris notamment.

Le niveau à partir duquel un son est perçu (seuil d'audition) dépend des fréquences* et varie également selon les espèces. Chez l'homme, dans la gamme des niveaux sonores de la vie courante (30 à 80 dB), la sensibilité de l'oreille est la plus grande aux fréquences* moyennes qui correspondent aux fréquences* conversationnelles. Ainsi, à niveau équivalent, un son grave ou aigu sera perçu moins fort qu'un son médium.



Sensibilité de l'oreille humaine selon les fréquences

	Fréquences*	Sensibilité maximale	Seuil d'audition
Humain	20 – 20 000 Hz	1 000 – 4 000 Hz	0 dB
Mammifères terrestres	10 – 50 000 Hz	Variable	0 dB
Oiseaux	100 – 10 000 Hz (<i>rapaces : jusqu'à 12 000 Hz</i>)	Variable	5 - 15 dB
Chiroptères*	Jusqu'à 150 000 Hz	Variable	Bas
Insectes	Jusqu'à 300 000 Hz	20 000 – 60 000 Hz	Élevé (> 40 dB : papillons > 80 dB : cigales)
Amphibiens*	100 – 4 000 Hz	400 – 900 Hz	20 – 40 dB
Mammifères marins	De quelques Hz à près de 200 000 Hz	Variable	Variable

Comparaison du spectre auditif de différents taxons*

LE BRUIT ET LA POLLUTION SONORE

Le bruit est un son dont la présence est inopportune, gênante, voire perturbante ou dangereuse. La notion de bruit est donc intrinsèquement liée à celle de la gêne, de la perturbation ou du brouillage des messages. C'est pourquoi l'on parle en théorie de l'information de bruit de fond ou de bruit informationnel. De la sorte, le bruit peut être rangé directement dans la catégorie des pollutions qui affectent les organismes : la frontière entre le bruit et la pollution sonore est ainsi très ténue.

Pour les êtres humains, le bruit est constitué de sons perçus comme disharmonieux, qui produisent une sensation auditive considérée comme désagréable, gênante, voire dangereuse pour la santé et/ou douloureuse : le terme de pollution sonore s'applique aux effets provoqués par un ou des bruit(s), allant des conséquences de la gêne momentanée à des troubles graves pour la santé.

Au niveau local, le bruit est considéré par les populations humaines au premier rang des nuisances présentes dans l'environnement immédiat, à un niveau comparable avec celui de la pollution atmosphérique. Ainsi, en Île-de-France, les trois quarts des habitants se déclarent préoccupés par le bruit, selon une enquête réalisée pour Bruitparif par le CREDOC en 2016. Un tiers des personnes interrogées déclarent que les nuisances sonores font partie des inconvénients liés au fait d'habiter la région en question : la satisfaction causée par l'environnement sonore n'est que de 58 %. Ces chiffres sont à rapprocher d'enquêtes nationales qui situent la préoccupation liée au bruit au même niveau que celle causée par la pollution atmosphérique.

En France, la pollution sonore est du point de vue juridique une notion d'apparition récente, bien que les premiers textes réglementaires¹ traitant de lutte contre le bruit fassent leur apparition en 1978. La loi du 31 décembre 2012 est expressément dédiée à la lutte contre le bruit, mais c'est la loi d'orientation des mobilités de 2019 qui introduit la notion de pollution sonore et le droit reconnu à chacun de disposer d'un environnement sonore sain.

Ce qui vaut pour les êtres humains vaut sans doute aussi pour les autres êtres vivants, comme nous le verrons dans la suite de cette étude. De très

nombreux animaux communiquent par voie sonore et utilisent le son pour se repérer dans leur environnement. Ils sont donc affectés par les sons qui perturbent ces fonctions, à tel titre que l'on peut légitimement qualifier ces sons inopportuns de bruit pour les espèces concernées. La notion de bruit s'applique ainsi de façon extensive pour les animaux, voire, selon des recherches très récentes, pour certaines plantes.

En ce qui concerne la biodiversité, le bruit peut être causé par des sources abiotiques* comme biotiques*. Les premières sont liées aux événements sonores tels que le tonnerre, le vent, les vagues, la marée, les éruptions volcaniques, etc. Les secondes proviennent des sons produits par les êtres vivants, qu'il s'agisse d'espèces animales ou de l'être humain. Nous ne savons pas si les animaux perçoivent les bruits intempestifs comme disharmonieux, mais il n'en reste pas moins que nous verrons que les effets négatifs du bruit peuvent être caractérisés pour de multiples espèces et groupes d'espèces.

Dans le sillage des études menées à ce sujet, la première partie de cette étude portera essentiellement sur les effets du bruit anthropique sur les espèces et les groupes d'espèces : de ce fait, le terme de pollution sonore désignera principalement les impacts de ce type de bruits sur la biodiversité. Il s'agit du bruit des transports en premier lieu, à commencer par celui produit par la route, et à un moindre degré par les transports ferrés et aériens. Mais il faut aussi tenir compte des bruits engendrés par l'industrie, le voisinage (incluant la musique), et également plus ponctuellement par la construction et la démolition d'immeubles, les activités militaires, la gestion des déchets, les éoliennes, etc.

Globalement, ces foyers de pollution sonore accompagnent la progression de l'urbanisation, qui est croissante dans le monde entier. En mer, le bruit d'origine humaine est aussi d'origine multiple, qu'il s'agisse des eaux de surface ou des profondeurs, à la fois sur les côtes et en haute mer : circulation des navires de toute sorte et des véhicules de loisir (jet-ski, etc.), exploitation des ressources sous-marines, exploration sismologique, travaux de toutes sortes (battages de pieux, notamment), éoliennes *off-shore*, hydroliennes, exercices militaires, etc.

Du fait de l'expansion des activités humaines à l'échelle du globe et de la généralisation de l'industrialisation au cours du XXe siècle, rares sont devenus les lieux exempts de toute perturbation

¹ Arrêté du 6 octobre 1978 relatif à l'isolement acoustique des bâtiments d'habitation contre les bruits de l'espace extérieur et circulaire du 15 novembre 1978 relative à la

lutte contre le bruit au voisinage des infrastructures de transports terrestres.

sonore d'origine humaine, qu'il s'agisse des milieux terrestres comme des océans. À ce jour, les zones où l'on n'entend plus que des sons d'origine naturelle ont diminué de 50 % à 90 % à l'échelle du globe par rapport à l'époque préindustrielle. Et même dans les zones peu peuplées, il faut compter avec le passage des avions et des autres aéronefs.

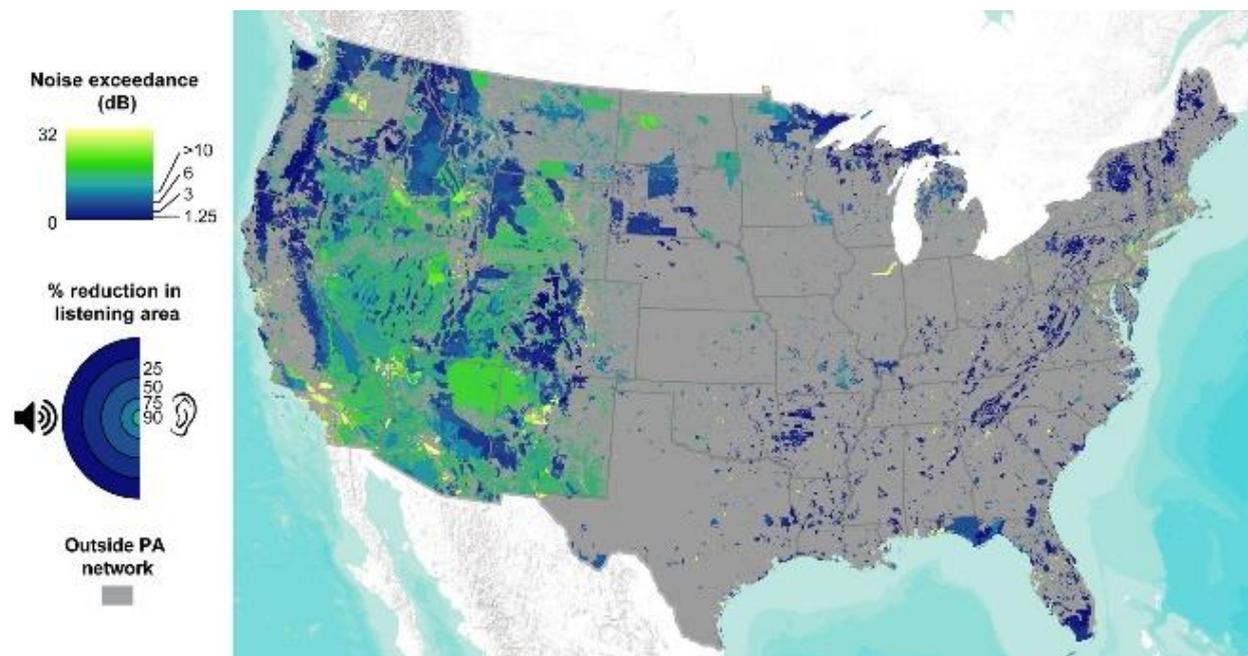
Ces perturbations d'origine humaine sont ainsi sensibles dans les zones habitées et exploitées par l'être humain et ont pris une telle ampleur qu'elles sont fortement présentes même dans les zones naturelles protégées, définies par l'Union internationale pour la conservation de la nature comme des espaces géographiques clairement définis, reconnus, dédiés et gérés par des moyens légaux ou autres, afin de favoriser la conservation à long terme de la nature, des services écosystémiques* et des valeurs culturelles.

L'étude la plus complète sur la pollution sonore des espaces protégés a été menée en 2017 aux États-Unis : cette année-là, R. T. Buxton et ses collaborateurs ont réalisé dans de nombreux États du pays cette étude à partir de milliers d'heures

d'enregistrements acoustiques prélevés dans 492 sites classés en tant qu'aires protégées. Les résultats ont ensuite été extrapolés aux 100 000 sites existants (soit 14 % de la surface du pays). Il en ressort que le bruit anthropique dépasse le niveau sonore naturel de bruit de fond dans 63 % des zones protégées. Ce bruit d'origine anthropique multiplie par dix le niveau sonore dans 21 % des zones protégées (soit une réduction de la zone d'écoute de 90 %). En outre, 14 % des territoires qui abritent des espèces menacées présentent un tel facteur de multiplication par dix.

De la même façon, il y a tout lieu d'estimer que les aires marines protégées, qui représentaient en 2015, 3,4 % de la surface des mers et océans dans le monde, ne sont pas épargnées par les nuisances sonores d'origine anthropique.

La pollution sonore est ainsi une réalité à l'échelle du globe, et si l'IPBES ne la considère pas encore comme une source majeure de recul de la biodiversité, il y a tout lieu de croire que cette position sera revue à l'avenir à mesure que les études scientifiques sur la question continueront à se multiplier.



Cartographie des nuisances sonores sur le territoire des États-Unis. © Buxton R & Al, 2017, Science

PARTIE 1

L'IMPACT DU BRUIT SUR LA BIODIVERSITÉ

LA BIOACOUSTIQUE ET L'ÉCO-ACOUSTIQUE

L'existence d'effets du bruit sur la faune est connue depuis l'Antiquité, mais l'étude spécifique de ces phénomènes ne s'est réellement développée qu'au XXe siècle, sous la dénomination de bioacoustique : il s'agit de la discipline scientifique qui étudie la production et la réception des signaux acoustiques chez les animaux. Son domaine d'étude est vaste et comprend de nombreux objets. Il s'agit de mettre en relation les sons produits par les animaux et les types d'environnements sonores et d'identifier les fonctions des sons chez les espèces concernées. La bioacoustique analyse aussi l'anatomie des animaux en ce qui concerne sa relation aux sons, qu'il s'agisse de l'émission ou de la réception. Elle s'intéresse également à l'impact des sons sur l'environnement et à leurs conséquences sur le comportement des animaux.

La spécialité est apparue aux États-Unis pendant la guerre 1939-1945, notamment à travers les travaux de M.-P. Fish sur les bruits produits par les poissons, dont l'intensité suffisait dans certains cas à déclencher les mines dès leur pose. Les pionniers de la discipline se sont aussi intéressés aux systèmes de sonar* des chauves-souris, des dauphins et d'autres cétacés*.

La bioacoustique tente de comprendre le lien entre les caractéristiques des sons produits par un animal et le type d'environnement dans lequel il les utilise, ainsi que les fonctions pour lesquelles ils sont adaptés. La discipline s'est donc intéressée largement aux systèmes sonores de communication animale, en alliant des disciplines (captation des sons, enregistrement, etc.) qui étaient peu approchées jusqu'alors. Les progrès de l'informatique ont depuis fait entrer les logiciels dans ce domaine d'étude afin de traiter et d'interpréter les sons de façon numérique.

Le métier de bioacousticien allie ainsi des disciplines multiples (biologie, mathématiques, physique, éthologie, linguistique, sciences de l'ingénieur, etc.) pour étudier le comportement d'espèces données en matière de relation aux sons. L'anatomie fait aussi partie des disciplines impliquées lorsqu'il s'agit d'étudier les mécanismes de production et de perception des sons par les animaux. On peut également citer les neurosciences mobilisées pour analyser la perception des sons.

La bioacoustique classe les sons en trois types : la biophonie (les sons d'origine biologique), la géophonie (les sons d'origine géophysique comme le vent, les courants marins, les mouvements de glace, les éruptions volcaniques, les tremblements de

terre...) et l'anthropophonie (les sons de nature anthropique, générés par l'homme). Depuis quelques décennies, la bioacoustique a connu un véritable essor et analyse de plus en plus les effets des bruits anthropiques, ceci afin de contribuer à la coexistence entre les activités humaines et la conservation des milieux et des espèces.

La discipline inclut le dépistage et le suivi acoustique d'espèces et de populations : des travaux récents ont par exemple étudié spécifiquement les possibilités de dénombrement des loups à partir de leurs productions sonores. En France, le protocole de science participative « Suivi temporel des oiseaux communs » (STOC) s'appuie précisément sur la reconnaissance du chant de ces oiseaux. Dans ce cadre, il est fait appel à des ornithologues professionnels ou amateurs pour recenser ces espèces en se rendant périodiquement dans les milieux où ils sont présents, sans qu'il soit nécessaire de les voir : les participants se rendent sur le terrain et relèvent les chants de tous les oiseaux entendus durant deux fois cinq minutes dans dix stations situées dans un carré de deux kilomètres de côté, ceci à deux reprises avant et après le 8 mai de chaque année. Les informations regroupées permettent par la suite de suivre l'évolution de la population de ces espèces d'oiseaux, globalement orientée à la baisse.

La bioacoustique débouche de la sorte sur l'établissement de prédictions robustes, en particulier sous la forme de modélisations de la propagation de sons biologiques dans un milieu particulier, ainsi que sur la détermination des sensibilités auditives des espèces concernées, par l'étude des seuils de tolérance auditive de ces espèces face à une pollution sonore et par la prévision et la prévention des effets à long terme d'une exposition prolongée à des sources sonores artificielles.

À noter aussi l'émergence plus récente de la discipline de l'éco-acoustique, qui étudie les paysages sonores propres à tel ou tel écosystème*. Les paysages acoustiques ou paysages sonores ont été définis par Bernie Krause dans les années 70, et remis à la mode chez les scientifiques dans les années 2010 notamment par la création de l'International society of ecoacoustics (ISE).

Plus un son environnemental est complexe, et plus il est possible de supposer que le nombre d'espèces animales présentes est élevé. Plus généralement, l'éco-acoustique étudie les relations entre les organismes vivants et leur environnement sonore.

Un des objectifs poursuivis par l'éco-acoustique est de donner une estimation de la biodiversité. On se reportera notamment aux travaux de Jérôme Sueur, éco-acousticien et Maître de conférences au Muséum national d'Histoire Naturelle. L'éco-

acoustique vise à détecter la présence des animaux par la reconnaissance de leurs types de sons et en tenant de les localiser dans l'environnement. L'éco-acoustique s'intéresse également à leurs comportements, à leurs activités et à leurs interactions. Enfin, l'éco-acoustique étudie la manière dont les sons anthropiques peuvent agir sur les écosystèmes.

L'éco-acoustique est par exemple précieuse lorsqu'il s'agit d'étudier un écosystème* au-delà des données que peuvent fournir les satellites, qui ne saisissent pas ce qui se passe sous le couvert végétal. C'est notamment le cas dans les forêts tropicales, dans lesquelles le son est un moyen de communication essentiel compte tenu de l'opacité visuelle produite par le mur végétal : dans ce milieu, les insectes, amphibiens*, oiseaux et mammifères utilisent principalement les moyens sonores pour se repérer et échanger des signaux. Il en va de même dans le milieu aquatique, où il est difficile de voir à plus de 30 mètres de distance. D'une manière générale, l'acoustique est une méthode d'observation complémentaire des observations visuelles. Elle donne des informations supplémentaires, notamment en contribuant à décrire le fonctionnement de l'écosystème (par exemple le fait que certaines espèces émettent des sons tôt le matin, et que d'autres sont plutôt nocturnes).

COMMUNICATION ET COMPORTEMENT

La relation des animaux au son est très souvent essentielle pour la communication et pour le comportement des espèces. À cet égard, comme nous l'avons déjà vu (voir page 9), il est essentiel de rappeler que le son perçu par les animaux dépend fortement des espèces, donc de leurs appareils auditifs respectifs. Si l'oreille humaine d'un individu jeune réagit aux sons sur une plage de fréquence* de quelque 16 Hz à 22 000 Hz (sa performance baisse dès l'âge de 20 ans environ) à partir de 0 dB, il apparaît qu'un chat perçoit les sons à partir de - 5 dB sur la plage de fréquence* allant de 45 Hz à 60 000 Hz.

Les audiogrammes* des différentes espèces sont ainsi très variables et leurs mondes sonores varient donc de façon considérable. La règle est toutefois que les espèces perçoivent au moins la gamme de sons qu'elles sont capables d'émettre et souvent au-delà, ce qui indique que nombre d'entre elles sont attentives au bruit présent dans leur environnement, bien au-delà de la communication intraspécifique.

L'utilisation du son à des fins de communication est courante notamment chez les arthropodes* et les vertébrés*, en milieu aquatique comme en milieu terrestre : elle concerne certains insectes, tout

comme certains diplopodes* et arachnides*, mais aussi les mammifères, les oiseaux et les amphibiens*. La communication concerne tout d'abord l'espèce propre, mais dans certains cas, les animaux sont capables d'interpréter aussi les signaux émis par d'autres espèces de façon volontaire ou non. Ils perçoivent également les sons d'origine non vivante, comme le bruit d'un torrent, le son de la pluie, le grondement du tonnerre.

Les signaux acoustiques sont utilisés par les animaux pour toute une série de fonctions :

- Recherche de nourriture.
- Recherche de partenaires sexuels.
- Définition et défense du territoire.
- Maintien du contact entre individus.
- Demande de nourriture (chez les jeunes).
- Aggression et défense.
- Vigilance contre les prédateurs.
- Stimulation.

Par rapport aux modes de communication visuel et olfactif, l'utilisation de signaux acoustiques a pour avantage de ne pas être freinée aisément par les obstacles et donc de porter potentiellement à longue distance. Les autres avantages sont les possibilités de communiquer dans l'obscurité de façon omnidirectionnelle et très rapide. Chez les chiroptères*, qui sont équipés d'un système de sonar*, le recours préférentiel aux signaux sonores permet même aux individus de se repérer dans l'espace et d'y repérer leurs proies : on parle alors d'écholocation*.

Une distinction à opérer concerne la différence entre le chant et le cri. Le cri ou l'appel est un signal bref et non modulé, qui peut présenter des fonctions variées : avertissement, inquiétude, alerte, demande de nourriture, contact entre partenaires, etc. Le chant est quant à lui un signal complexe, articulé et modulé, qui a le plus souvent pour fonction la défense du territoire ou la conquête d'un partenaire sexuel. Nombre d'oiseaux, d'amphibiens*, d'insectes et de mammifères sont aptes au chant. Ce chant peut être inné ou acquis : dans ce dernier cas, il n'est pas rare qu'il se modifie tout au long de la vie des individus au gré des échanges avec les congénères.

Pour les organismes dotés du sens de l'ouïe, l'interprétation des signaux sonores est donc un moyen privilégié de communication avec les congénères, les autres espèces, voire l'espace extérieur.

Dans ces conditions, la présence de bruits anthropiques peut avoir des conséquences variées : baisse de la qualité de la communication, dégradation de l'efficacité de la recherche de nourriture, modification de la reproduction et donc de la génétique des populations animales, baisse de la vigilance envers les prédateurs.

En dernière analyse, la capacité de survie des animaux est amoindrie par un ensemble de facteurs sonores qui agissent solidairement, à la fois du point de vue comportemental et physiologique. Du point de vue des écosystèmes*, le bruit anthropique est un facteur de sélection supplémentaire qui favorise les espèces les plus résistantes et participe ainsi à la réduction de la biodiversité, ce phénomène étant notamment bien connu en ville. Le bruit anthropique rend ainsi les écosystèmes* moins accueillants, en particulier pour les espèces qui utilisent des sons graves pour communiquer, puisque les sons produits par l'homme se situent essentiellement dans ces gammes de fréquence*.

Au niveau de l'individu et de l'espèce, les réactions au bruit anthropique sont multiples. Ce bruit agit tout d'abord par effet de masque. Les espèces animales peuvent ainsi, selon les cas, s'habituer au bruit, développer des stratégies d'adaptation (voir ci-dessous) ou s'éloigner des sources bruyantes pour aller à leur recherche de nouveaux territoires.

Parmi les stratégies d'adaptation connues, on commencera par l'effet Lombard : dans ce cas, le signal est tout simplement émis plus fort. D'autres espèces augmentent aussi la fréquence* de l'émission sonore. Un certain nombre d'oiseaux, d'amphibiens* et d'insectes savent ainsi adapter leurs chants afin de limiter leur recouvrement par le bruit de fond. C'est sous nos latitudes notamment le cas de la Mésange charbonnière ou du Merle noir, qui augmentent les fréquences* de leurs chants en milieu bruyant. Mais ce décalage vers l'aigu ne peut probablement être utilisé que par les espèces qui utilisent des gammes de sons moyennes.

L'effet Lombard a aussi été décrit chez le Rossignol philomèle. Chez cette espèce, l'augmentation de la puissance acoustique ne compense pas totalement l'augmentation du bruit ambiant. De plus, il semble que cette augmentation ne soit pas neutre pour l'individu, puisqu'elle se traduirait par un effort supplémentaire pour son métabolisme* – ce d'autant plus que les rossignols en question augmenteraient surtout la puissance acoustique de leurs notes les plus faibles.

D'autres espèces avancent leur émission dans le temps au fil de la journée et parfois selon les saisons, par exemple en cas de nuisances causées par une infrastructure routière. Une autre stratégie consiste à envoyer les messages de façon plus redondante afin qu'ils aient plus de chance d'être reçus malgré le bruit de fond. Cette méthode a néanmoins des effets comportementaux et métaboliques* importants, puisque l'animal doit alors passer plus de temps à

chanter au détriment d'autres activités.

LES EFFETS PHYSIOLOGIQUES DU BRUIT

Hormis les effets comportementaux, qui sont d'une très grande importance, les principaux modes d'action physiologiques du bruit peuvent être rapprochés chez l'homme et chez les animaux, notamment chez les mammifères et chez les oiseaux².

Chez l'homme, de nombreuses études épidémiologiques montrent que l'exposition chronique au bruit active les mécanismes du stress* et engendre notamment une gêne, une fatigue physique et auditive, des insomnies et perturbations du sommeil, une majoration de cardiopathies et des pathologies liées à l'immunité, des problèmes de santé mentale et d'apprentissage.

Pour le moment, l'essentiel des études menées sur les mécanismes physiopathologiques liés à l'exposition au bruit ont été menées en laboratoire chez l'animal, essentiellement chez le rat et la souris, mais également chez certains oiseaux (voir page 27) et amphibiens* (voir page 29). Une étude physiologique a aussi été menée en pleine nature chez une espèce de baleine (voir page 20). L'intérêt de ce type de travaux est double : donner un aperçu du rôle joué par l'exposition au bruit sur la dégradation de l'état de santé général de la faune et proposer des modèles physiologiques dont bon nombre de résultats sont extrapolables pour l'homme.

Chez le rat, l'exposition à un niveau de bruit élevé s'est traduite par une surproduction persistante de nombreuses molécules, notamment dans le cerveau, le foie et l'intestin. Au niveau cérébral, il a été observée une surproduction persistante de molécules impliquées dans les pathologies de type Alzheimer, associée à la surexpression de protéines inflammatoires marqueurs de neuro-inflammation et de stress* oxydatif. L'exposition chronique au bruit durant une vie pourrait ainsi accélérer le développement de pathologies de type Alzheimer du fait de l'installation progressive d'un état inflammatoire cérébral. Au niveau du foie et de l'intestin, une augmentation persistante de molécules contribuant à la résistance à l'insuline a été observée, ce qui est facteur de diabète. L'installation d'un état inflammatoire dû à la présence de molécules pro-inflammatoires a également été

² Pour plus de précisions et pour prendre connaissance des références scientifiques de cette section, il est possible de

se référer à l'annexe rédigée par Elisabeth Devilard, dont le présent texte reprend l'essentiel (voir page 49).

notée, ceci en parallèle avec une altération de la flore intestinale. Il est ainsi suggéré que l'exposition chronique au bruit durant une vie pourrait faciliter le développement du syndrome métabolique associé à l'obésité et qui augmente le risque de diabète et de maladies cardiovasculaires.

Une expérience menée sur des souris a également trouvé une corrélation entre cardiopathies et exposition au bruit du fait de l'augmentation du taux de nombreuses molécules et hormones.

Dans la suite de ce rapport, les impacts seront décrits selon les deux grands milieux (aquatique et terrestre), et selon les taxons* (par groupe d'espèces ou par espèce). Certains aspects des effets de la pollution sonore seront examinés pour des espèces précises, mais en ce qui concerne les groupes d'espèces, les effets seront présentés de façon globale : il faudra alors garder à l'esprit que tous les effets décrits ne concernent pas nécessairement toutes les espèces membres du groupe.

LE MILIEU AQUATIQUE

Introduction

Contrairement à ce qu'énonçait le commandant Cousteau dans les années 1950 pour caractériser l'océan, les milieux marins ne sont pas « le monde du silence ». Depuis cette époque, un certain nombre d'études réalisées ont montré que l'océan est un monde sonore et même particulièrement amplifié par le fait que les océans se comportent comme d'immenses *open spaces*.

En mer, les sons sont d'abord produits par les phénomènes atmosphériques, la marée, les courants et la houle, mais aussi par la glace de mer. Il faut naturellement y ajouter les sons produits intentionnellement ou non par les organismes vivants pour remplir des fonctions aussi variées que le repérage, la communication intra ou interspécifique, l'alimentation, la reproduction, l'éducation des jeunes, le comportement face aux prédateurs, etc. De sorte que les enregistrements de paysages sonores sous-marins sont souvent particulièrement riches, pouvant évoquer parfois l'ambiance de forêts tropicales ou tempérées.

Les signatures acoustiques des milieux marins diffèrent énormément en fonction de la latitude et de la profondeur, ainsi que selon les habitats (fonds rocheux ou sableux, récifs coralliens, herbiers...) et en fonction de la population animale. Dans l'eau, le son se propage environ cinq fois plus rapidement que dans l'air, sa célérité dépendant toutefois de la pression (profondeur), de la température et de la

salinité. Les sons se répercutent sur la surface et sur le fond. La vitesse du son dans l'eau est ainsi de l'ordre de 1 500 m/s, le réchauffement climatique induisant une acidification des océans qui y provoque une accélération de la propagation du son. Le son se propage dans les masses aquatiques indépendamment des courants, et il faut noter que si la plupart des études concernent les mers et les océans, des phénomènes comparables ont sans aucun doute lieu dans les rivières, les lacs et les étangs.

Sous l'eau, l'unité de niveau sonore est fondée sur la pression de référence de 1 μPa (10^{-6} Pa), le tableau de conversion entre pression des ondes sonores et dB figurant ci-dessous.

Pression (μPa)	1	10	100	1000	10 000	100 000	1 000 000
dB réf. 1 μPa	0	20	40	60	80	100	120

Conversion entre pressions des ondes sonores subaquatiques et dB réf. 1 μPa

Une comparaison avec l'échelle des décibels en milieu aérien peut être construite dès lors que l'on tient compte de la différence des références entre les deux échelles (1 μPa en milieu aquatique et 20 μPa en milieu aérien) et de l'équivalence en termes d'intensité acoustique : ce dernier point permet de tenir compte du fait que l'eau, contrairement à l'air, n'est pas un milieu compressible. Le tableau ci-dessous donne un ordre de grandeur des comparaisons possibles, ce qui permet de se rendre compte que les milieux aquatiques sont particulièrement sonores. Il doit toutefois être précisé que l'exercice de comparaison est complexe du fait des écarts d'échelle mais aussi parce qu'il n'y a pas de relation directe entre un son dangereux pour l'homme dans l'air et pour les animaux dans l'eau (cf. <https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/1125/857>).

Activités sous-marines	dB sous-marin à 1 m	dB aérien à 1 m	Activités aériennes
TNT	272-305	210-243	
Activités sismiques	240-260	178-198	
Battage de pieux	243-257	181-195	
Échosondeurs	225-245	163-183	
Sonars* militaires	214-240	152-178	Explosion
Géophysique légère	204-227	142-165	Avion à réaction
Dispositifs d'éloignement	150-205	88-143	Formule 1
Gros navires	176-192	114-130	
	181	120	Marteau piqueur
Forages sous-marins	145-190	83-128	
Petites embarcations	169	108	
	160-175	98-113	
Éoliennes en fonctionnement	142-151	80-89	Orchestre symphonique ³

Comparaison des niveaux sonores sous-marins et aériens³

³ Selon S. Chauvaud et al., *Impacts des sons anthropiques*

sur la faune marine, Quae, 2018.

Dans le milieu maritime, les impacts de la pollution sonore sur les mammifères sont les plus étudiés après ceux concernant les oiseaux en milieux terrestres : cela est dû au fait que certaines conséquences sur ces animaux sont plus directes et visibles, en particulier quand il s'agit d'échouages en masse. De façon générale, l'audiogramme* des animaux marins montre que la plage de fréquences* perçues est plus étendue que chez les animaux terrestres. Dans l'ensemble donc, ces animaux disposent d'une ouïe plus large bande.

La cause principale de la pollution sonore en mer provient du trafic maritime, qui est en constant accroissement depuis plus d'une centaine d'années, et qui est devenu de plus en plus bruyant du fait de la motorisation. En Méditerranée, le trafic des cargos et des navires de croisière double ainsi actuellement en moins de quatre ans. Les navires de grande taille (cargos, paquebots), qui produisent des bourdonnements assourdissants, ne sont pas les seuls en cause. Il faut aussi compter avec les prospections géophysiques et les sites d'extraction *off-shore*, qui créent des nuisances très importantes depuis la phase d'exploration jusqu'à leur fonctionnement, mais aussi le dragage, et l'utilisation de canons à air lors des campagnes de recherche pétrolière et gazière. Les exercices militaires utilisent quant à eux des sonars*, tout comme la pêche industrielle. Une nouvelle source de bruit a émergé depuis peu et se développe : l'implantation d'éoliennes *off-shore*, qui génère des bruits de pilonnage pour leur installation puis des bruits liés aux pales en fonctionnement ; et il faut également compter avec l'installation et le fonctionnement des hydroliennes, dont le nombre est appelé à se multiplier.

L'ensemble de ces sources sonores pose de graves problèmes à la faune marine dans toutes ses composantes. Le *Natural Resources Defense Council* des États-Unis estime ainsi que la pollution sonore dans les océans double tous les dix ans depuis 1950 et que le niveau sonore global sous-marin a augmenté de 20 dB au cours des cinquante dernières années. Sur la même période, le niveau sonore dans le domaine des fréquences* inférieures à 1000 Hz, particulièrement le fait de la navigation, a été multiplié par plus de vingt, ce qui est particulièrement problématique pour les poissons, comme nous le verrons plus loin.

En mer, la pollution sonore affecte la capacité de communication entre animaux et complique donc les rencontres entre partenaires en particulier pour la reproduction : il en résulte un moindre brassage génétique des populations. La pollution sonore peut parfois remettre en cause la survie, notamment quand elle engendre des problèmes de malnutrition en cas de plus grande difficulté à utiliser le signal

sonore pour la recherche de proies, surtout lorsque les activités de pêcheries industrielles ont déjà appauvri les écosystèmes marins.

La pollution sonore maritime complique aussi souvent l'orientation et par conséquent la précision des déplacements. Dans les cas les plus extrêmes, la pollution sonore peut provoquer des échouages ou la collision avec les navires. Dans tous les cas, elle exige une vigilance plus élevée et engendre de la sorte un stress* supplémentaire. Il résulte globalement de l'ensemble de ces contraintes une plus grande dépense énergétique en cas de bruit chez les organismes marins.

Les mammifères aquatiques

Les relations entre le monde sonore et les mammifères aquatiques font partie des objets bien étudiés par la recherche et l'impact des émissions sonores anthropiques sur les mammifères marins est relativement bien connu : les études qui leur sont consacrées ainsi qu'aux poissons adultes représentent environ 80 % des travaux menés sur la question dans le milieu maritime. À ce titre, le travail de recension complet effectué par Richardson et al. dans l'ouvrage *Marine Mammals and Noise*, qui date de 1995, fait toujours référence. Il faut aussi noter que les mammifères marins sont les seuls organismes aquatiques qui ont donné lieu à des réglementations nationales et internationales afin de ménager leur environnement sonore dans un certain nombre de cas.

À travers leurs différents taxons*, les mammifères marins sont présents pour ainsi dire dans tous les océans et dans toutes les mers du monde, tout comme dans certains cours d'eau, et un certain nombre d'espèces migrent au long cours, comme le font plusieurs espèces de baleines qui vivent dans des sites différents pour s'alimenter et pour se reproduire. Les mammifères marins se divisent en cétacés* (baleines, dauphins, épaulards, etc.), siréniens* (dugong et lamantins), carnivores (Loutre de mer et ours polaire) et pinnipèdes* (otaries, phoques et morses).

Qu'il s'agisse de cétacés*, de siréniens* ou de pinnipèdes*, les capacités d'émission et de réception sont très développées et les signaux sonores sont utilisés pour la recherche de nourriture, pour la rencontre avec les partenaires sexuels, pour la localisation et l'orientation des déplacements (y compris au long cours), pour éviter les prédateurs, pour élever les jeunes et pour régler les relations sociales, entre autres. Chez certaines espèces, et notamment chez l'épaulard, la transmission des signaux sonores est même culturelle, comme c'est le cas également chez de nombreux oiseaux.

La raison de cette préférence pour la dimension du

sonore est simple : sous l'eau, les signaux acoustiques sont de loin ceux qui se propagent le mieux à distance, notamment si on les compare aux signaux visuels.

Les cétacés*, mammifères marins vivant entièrement dans l'eau des océans et de certains fleuves, se divisent en deux sous-groupes : les odontocètes, munis de dents, et les mysticètes (baleines) dotés de fanons. La communication des odontocètes fait principalement appel à des fréquences* moyennes à hautes (de 1 kHz à 20 kHz), et ils utilisent l'écholocalisation* en recourant à de très hautes fréquences* : de 20 kHz à près de 200 kHz pour certaines espèces. Il s'agit pour celles-ci de connaître la profondeur et/ou la distance avec les objets aquatiques ou encore de localiser leurs sources de nourriture. Les mysticètes* sont dans l'ensemble sensibles à des fréquences* basses à moyennes (de 12 Hz à 8 kHz). Ils n'émettent pas de sons dédiés spécifiquement à l'écholocalisation*. Le pic de sensibilité auditive des pinnipèdes* se situe quant à lui généralement entre 1 kHz et 20 kHz.

La grande majorité des mammifères marins ont tendance à fuir les sources sonores, quitte notamment à interrompre leurs plongées, ce qui modifie leur recherche de nourriture et leur temps de repos. Il a également été noté un risque pour le groupe de se dissocier pour échapper à la source sonore. C'est par exemple le cas chez la Baleine boréale. Le rayon d'évitement de la source sonore peut être important et atteindre plusieurs dizaines de kilomètres dans le cas de la circulation de brise-glace, qui sont particulièrement bruyants. Les cétacés* évitent aussi le bruit des éoliennes *off-shore* dans un périmètre de 300 mètres, mais cette distance peut atteindre un kilomètre chez les pinnipèdes*. Dans l'ensemble, les effets du bruit sur les animaux concernés dépendent de facteurs multiples tels que la fréquence*, l'intensité et la durée.

Les sons anthropiques peuvent avoir des effets variés sur les mammifères marins. Dans les cas les plus extrêmes, ils peuvent provoquer des blessures et des échouages (donc la mort, dans certains cas), des mouvements de panique ou encore des pertes auditives temporaires voire permanentes. Parmi les autres effets immédiats du bruit figure une grande variété de réponses comportementales, les impacts liés au masquage et le stress*, ainsi que d'autres réponses physiologiques.

Un autre risque léthal a été documenté chez la baleine à bec de Cuvier : certains individus percevant des bruits anthropiques stressant remontent à la surface trop rapidement et sont ainsi victimes d'embolies mortelles. Plusieurs cas d'échouages ont été documentés, notamment lors des campagnes militaires de l'OTAN où des nouveaux sonars à moyennes et basses fréquences* ont été testés.

Une étude dédiée (Y. Bernaldo de Quirós et al., 2019) rappelle ainsi que les échouages de masse de baleines à bec de Cuvier étaient extrêmement rares avant les années 1960, et qu'ils se sont multipliés avec le développement de l'usage des sonars* militaires depuis cette période. Après examen de plus de 120 cas d'échouages, l'étude établit un lien de causalité probable entre ces deux phénomènes, ce qui est conforté par le fait que les initiatives prises autour des Îles Canaries pour atténuer ce type d'événements sonores ont montré de bons résultats.

Les mammifères marins peuvent en cas d'exposition importante au bruit être victimes de pertes d'audition temporaires ou permanentes, par exemple en cas d'exposition à des tirs de canons à air utilisés dans le cadre de recherches de pétrole et de gaz. Les pertes d'audition temporaires sont notamment bien décrites chez certaines espèces : c'est notamment le cas chez les bélugas, les grands dauphins, les marsouins communs ou encore les otaries de Californie, les phoques communs ou les éléphants de mer. Chez les pinnipèdes*, l'origine des pertes d'audition peut bien entendu aussi provenir des bruits circulant dans l'air.

Comme les autres animaux, les mammifères marins peuvent réagir au masquage produit par le bruit anthropique. Ce type de réponses est bien documenté. En présence de bruit anthropique, un certain nombre d'espèces modifient les paramètres de leurs émissions sonores. C'est particulièrement le cas chez les cétacés*, qui modulent leurs chants et leurs vocalisations en fonction du bruit ambiant.

Chez les mammifères aquatiques, le masquage par le bruit peut concerner aussi bien les sons émis à des fins de communication que l'écholocalisation*, les sources de bruit en cause pouvant notamment être les sons anthropiques, les sons émis par les prédateurs et par les proies, et même les sons produits par l'environnement. Un certain nombre d'espèces répondent au phénomène de masquage en augmentant l'intensité de leurs appels, en les répétant davantage ou en modifiant les fréquences* d'émission (Erbe, 2008). Le béluga, quant à lui, ajuste ses clics d'écholocalisation* en utilisant des fréquences* plus élevées et des signaux plus intenses lorsque le bruit de fond est important (Au et al., 1985). Et exposée à des basses fréquences*, la baleine boréale réagit en augmentant la durée de son chant de 29 % en moyenne, les variations individuelles étant fortes (Miller et al., 2000).

On note aussi qu'un certain nombre de mammifères marins tendent à réduire ou à cesser leurs vocalisations dans un contexte bruyant : c'est notamment le cas chez la baleine franche en réponse aux signaux émis par des navires (Watkins et al., 1986). De la même façon, les baleines à bec de Cuvier cessent leurs appels d'écholocalisation* lorsqu'elles

sont soumises aux sons de sonars* (Tyack et al., 2011, DeRuiter et al., 2013.)

Les réponses comportementales des mammifères aquatiques peuvent aller de modifications mineures du comportement jusqu'à des modifications sévères. Il s'agit en particulier de modifications des comportements de reproduction, de mise-bas, d'alimentation ou encore de repos.

Chez les pinnipèdes*, les réactions aux bruits anthropiques sont nombreuses et dans l'ensemble défavorables. C'est notamment le cas pour les bruits produits par les aéronefs, surtout s'ils volent à basse altitude. Lorsqu'elles sont soumises à ce type de bruit durant leurs stations sur les côtes ou sur la glace, de nombreuses espèces de pinnipèdes* se montrent agitées et, souvent, se précipitent dans l'eau de façon désordonnée : dans certains cas, une mortalité est même induite chez les jeunes, qui peuvent être écrasés lors de mouvements de foule par les adultes. La réaction des pinnipèdes* aux bruits aquatiques est moins bien connue.

Certaines baleines migratrices dont les baleines boréales et les baleines grises dévient leurs routes de migration lorsqu'elles sont confrontées à des bruits industriels (Richardson et al., 1995).

À noter toutefois que ces comportements d'évitement peuvent dans certains cas être modulés en fonction de l'activité des mammifères marins : selon les observations existantes, plusieurs espèces de dauphins évitent les navires lorsqu'ils se reposent, les ignorent lorsqu'ils sont à la recherche de nourriture et peuvent même les approcher lorsqu'ils sont motivés par des comportements de socialisation.

Dans le même ordre d'idées, le comportement du béluga face au trafic maritime est assez variable. Cette espèce fuit dans de nombreux cas les navires brise-glace (entre autres) jusqu'à une distance de 50 km et modifie alors ses comportements de retour à la surface, de respiration et de plongée. Il en résulte aussi une modification de ses vocalisations et de la composition des groupes. Mais les bélugas qui fréquentent le fleuve Saint-Laurent (Canada) sont plus tolérants, en particulier lorsqu'ils sont confrontés à des embarcations importantes, alors qu'ils tendent à fuir les petits bateaux et les embarcations qui circulent à grande vitesse, surtout lorsqu'ils sont âgés et/ou en train de se nourrir ou de se déplacer (Blane et Jaakson, 1994).

Par ailleurs, le stress* chronique causé par le bruit chez les mammifères marins implique des modifications dans le système immunitaire, la reproduction et le comportement. Lorsque le niveau de stress* induit se traduit par une hausse de la sécrétion d'adrénaline, il en résulte une hausse du rythme cardiaque, des échanges gazeux, de

l'attention et des flux de sang vers le cerveau et vers les muscles, ceci en vertu du schéma de préparation de la défense face à une agression externe.

Pour des raisons pratiques, la plupart des résultats montrant que le niveau de bruit ambiant tend à élever le niveau de stress* chez les mammifères marins portent sur des animaux en captivité (St. Aubin et Geraci, 1992). Ceci étant, Rosalind M. Rolland et al. (2012) ont montré que le bruit produit par les navires induisait une plus forte propension au stress* chez la baleine franche dans des conditions naturelles.

En effet, cette équipe de recherche a travaillé sur la réaction de cette espèce aux signaux acoustiques de basse fréquence*, en partant des études préalables sur cette question et en notant que le trafic maritime provenant des navires de taille importante, émettant dans une gamme de 20 Hz à 200 Hz, pouvait interférer avec la communication sonore de la baleine franche.

Chez cette espèce, un certain nombre de réponses à la pollution sonore étaient déjà bien connues : délocalisation, modifications comportementales et évolution de la fréquence* des appels et des intervalles entre ces derniers. Mais le hasard a eu pour conséquence que les attentats du 11 septembre 2001 se sont traduits par un arrêt du trafic maritime dans la baie de Fundy (Canada), car il n'était plus possible de faire escale dans les ports américains. Il en a résulté pendant quelques mois une baisse moyenne de la pollution sonore de 6 dB, cette baisse étant particulièrement significative en dessous de 150 Hz. Durant cette période, les analyses conduites sur les fèces des baleines franches ont montré que le taux de glucocorticoïdes (hormone de stress*) qu'ils présentaient étaient en forte baisse, première preuve apportée sur des mammifères aquatiques sauvages en matière d'impact chronique négatif du bruit anthropique sur le métabolisme*.

À noter enfin que l'approche bioénergétique laisse entendre que les populations d'un certain nombre de mammifères marins pourraient être affaiblies en raison du niveau de bruit ambiant : son impact se répercuterait tout au long de la vie des individus et de leurs groupes, notamment en ce qui concerne l'efficacité de leurs comportements alimentaires et reproductifs. Cela impliquerait en particulier une moindre santé chez les mères, ce dont résulterait une baisse de la capacité à mettre bas et à élever la progéniture dans de bonnes conditions, ce qui pourrait conduire à une certaine mortalité chez les jeunes comme chez les adultes (Costa, 2012). Ce serait en particulier le cas chez l'éléphant de mer, dont les comportements et le milieu de vie sont particulièrement bien étudiés. L'impact négatif de la pollution sonore sur les populations du grand dauphin est aussi assez bien connu (New et al., 2013).

Les poissons

Les poissons sont pour la plupart sensibles au bruit et nombre d'espèces émettent des sons variés en claquant du bec, en grinçant des dents, en frottant leur nageoire sur leurs écailles, en stridulant grâce aux opercules de leurs ouïes ou en utilisant des muscles sonores attachés à leur vessie natatoire* ou situés à proximité de celle-ci. Ils communiquent ainsi beaucoup entre eux en produisant des sons dans le registre des percussions. Les objectifs de cette communication sont variés : éloignement de prédateurs ou de concurrents, attraction des partenaires et parades nuptiales, etc. À ce jour, plus de 700 espèces de poissons sont connues pour émettre des sons, mais le nombre d'espèces concernées est sans aucun doute supérieur.

Les poissons n'ont pas besoin d'oreille externe pour entendre, car la densité de leurs corps est sensiblement égale à celle de l'eau : les vibrations sonores sont ainsi conduites directement dans les muscles, les tissus et les cartilages. L'audition est organisée chez les poissons à travers trois principaux organes : l'oreille interne, la vessie natatoire* et, dans une moindre mesure, le système de la ligne latérale mécano-sensorielle, qui se situe le long du corps. Certains poissons sont dépourvus de vessie natatoire*, mais ceux qui en sont pourvus et chez qui cet organe est relié à l'oreille interne sont dénommés spécialistes, par opposition aux poissons dits généralistes. La plupart des poissons entendent les fréquences* inférieures à 1000 Hz.

Jusqu'ici, l'impact du bruit anthropique a été assez peu étudié sur les poissons, chaque espèce réagissant différemment à ce type de nuisances. Certaines espèces présentent tout de même des signes de changements comportementaux lors d'une exposition à une pollution sonore : en présence de bruit, de nombreuses espèces de poissons montrent des signes de stress* et d'agitation, voire un relâchement des bancs pour les espèces grégaires.

En fonction du temps d'exposition à des bruits importants, un certain nombre de poissons présentent une atténuation ou une perte de l'audition. Les vibrations des ondes sonores peuvent également causer des dommages physiques tels que la détérioration de la vessie natatoire* ou encore la rupture de vaisseaux sanguins. Chez d'autres poissons, les sons provoqués par l'exploitation pétrolière sous-marine endommagent les cellules ciliées* dont est tapissé leur appareil auditif. Selon Jonathan Balcombe, auteur de l'ouvrage *À quoi pensent les poissons ?*, « le bruit intense dû à la prospection à l'aide [...] d'appareil à ondes sismiques a provoqué dans les zones [proches des côtes de la Norvège] la diminution de la population de morues et d'aigleflins et la baisse des taux de capture. »

Les dommages peuvent concerner les réactions comportementales et en particulier le masquage des sons biologiquement appropriés. Une étude (Caltrans, 2001) mentionne aussi la mortalité des poissons à proximité d'un site de fonçage de pieux. Cette mortalité a aussi été observée lors d'utilisation de canons à air chez des poissons généralistes et spécialistes, à grande proximité (quelques mètres) de la source sonore.

Popper et al. (2012) ont mené une étude dans le cadre de l'utilisation de canons à air pour la prospection sismique, ceci dans le delta du fleuve Mackenzie (Canada) auprès de trois espèces de poissons : le grand brochet, la corégone tschir et le mené du lac. Il en ressort que le brochet et le mené du lac ont montré des pertes auditives temporaires à partir d'une exposition de canon à air d'une intensité de 180 dB réf.1µPa. Une autre étude montre que les aloses savoureuses réagissent par la panique et par une nage erratique à compter d'un niveau de 185 dB, alors qu'elles s'éloignent de la source sonore entre 175 et 185 dB. D'autres travaux établissent que les larves de poissons grandissent moins vite dans les environnements bruyants qu'ailleurs.

D'autres effets sur les poissons sont documentés, en particulier des changements de comportement. De façon générale, les poissons ont tendance à fuir les sources de bruit et se montrent affolés par celles-ci : battage de pieux, passage de navires ou éoliennes *off-shore*, les réactions étant d'autant plus fortes que la source de bruit est plus proche et/ou intense.

Exposés à des niveaux élevés, des pertes auditives temporaires ont été observées chez certains poissons aussi bien au niveau de l'oreille interne que sur la ligne latérale et sur la vessie natatoire*. Les espèces spécialistes apparaissent comme plus sensibles que les généralistes à ce type de lésions. Que ce soit chez les spécialistes comme chez les généralistes, le bruit anthropique engendre chez les poissons un stress* supplémentaire qui se signale par une augmentation du débit cardiaque, de la ventilation ou du taux de cortisol. Parmi les études concernant les effets de niveaux sonores élevés, l'essentiel montre que les processus physiologiques des poissons sont atteints et certaines montrent même l'existence de lésions tissulaires. Il est même possible de tuer des poissons par des sons trop forts qui leur font exploser leur vessie natatoire.

Exposés à des bruits plus modérés, les poissons montrent des difficultés à communiquer avec les membres de leur espèce. Ainsi, une étude menée par Codarin et al. (2009) sur l'effet de la circulation de bateaux à moteur de plaisance, a montré que chez trois espèces de poissons (*Chromis chromis*, *Sciaena umbra* et *Gobius cruentatus*), le bruit émis par ces navires affecte la communication sonore intraspécifique par effet de masquage.

Les invertébrés marins

Certains animaux marins invertébrés* comme les mollusques et les coquillages n'ont pas de système auditif à proprement parler, mais sont tout de même affectés par la dimension du sonore : ils possèdent en particulier un organe sensoriel, nommé statocyste*, qui joue le rôle d'oreille interne et qui est composé de cellules ciliées*. Le statocyste* est constitué d'une chambre remplie de liquide et qui contient une statolite* comparable à celle de l'oreille interne des vertébrés*. Cet organe permet à de nombreux crustacés et à la plupart des céphalopodes* de maintenir leur position dans la colonne d'eau et d'identifier la direction verticale.

La plupart des crustacés marins (homards, crabes, crevettes, etc.) possèdent aussi de nombreux poils sensoriels associés à des cellules ciliées*. Ils ont pour but de déceler les vibrations de substrats liés à des perturbations mécaniques et permettent de détecter les mouvements des autres organismes situés à proximité. Ils permettent généralement de détecter des fréquences* allant jusqu'à 100 Hz. De plus, les crustacés possèdent des organes chordotonaux, qui sont connectés au système nerveux central : ils peuvent indiquer une position, un mouvement ou un état de stress* et sont capables de détecter les ondes sonores de basse fréquence*.

De nombreux invertébrés* marins sont capables de produire des sons de façon volontaire ou non en déplaçant ou en frottant les parties dures de leurs corps. Il peut s'agir de signifier la défense du territoire, de préparer l'accouplement ou d'exprimer l'agressivité. La fréquence* des signaux connus est comprise entre 87 Hz et 200 kHz.

La mortalité relevée chez les invertébrés* en lien avec le bruit semble concerner uniquement les céphalopodes* : l'utilisation de canons à air de navires sismiques a notamment provoqué l'échouage de calamars géants ainsi que la mort directe en mer d'un calamar, ce qui a été observé au large du Brésil.

Ainsi, les céphalopodes* souffrent du bruit. Une expérience de M. André (2011) a soumis 87 céphalopodes* de quatre espèces (*Loligo Vulgaris*, *Sepia Officinalis*, *Octopus Vulgaris*, *Illex Coindetii*) à une exposition sonore d'une fréquence* de 50 à 400 Hz* avec un niveau de 157 à 175 dB réf.1µPa pendant deux heures – c'est-à-dire les fréquences* utilisées pour les tests par sonar* pour rechercher du pétrole ou du gaz naturel. Après cette exposition, les cellules ciliées* des statocystes* des calamars montraient des signes de lésions. Il en résulte pour ces animaux une incapacité à chasser, à échapper aux prédateurs et même à se reproduire.

Au stade larvaire, les coquillages et les crustacés ont fait l'objet d'études lors de la phase de biofouling*.

L'effet néfaste d'un bruit anthropique élevé sur le métabolisme* d'une espèce de céphalopode* a été observé, et par ailleurs, une hausse du bruit ambiant entraînerait une accélération du métabolisme* chez certains crustacés. Il apparaît aussi que l'émission de basses fréquences* entraîne une baisse du rythme respiratoire chez les poulpes et que des bruits semblables aux émissions sismiques pourraient entraîner des malformations chez les larves de pectinidés*.

Chez certaines huîtres, il semble enfin que l'on soit aussi sensible au bruit. Comme d'autres invertébrés*, les huîtres ne possèdent pas d'oreille interne mais disposent d'un statocyste* qui leur permet de détecter leur position par rapport à la marée grâce au bruit des vagues. Elles sont ainsi sensibles aux vibrations des ondes sonores. Dans le cadre d'une expérience menée par M. Charifi et al. et rendue publique en 2017, 32 huîtres du Pacifique (*Crassostrea gigas*) ont été immergées avec des capteurs collés sur leurs valves. Un son d'une fréquence* variant de 10 à 20 000 Hz était diffusé pendant trois minutes toutes les 30 minutes pendant sept à huit heures. Il en ressort que les huîtres se ferment de façon synchrone pour les fréquences* allant de 10 à 1 000 Hz, soit les fréquences* émises par l'essentiel de la flotte marine. Cette pollution conduit donc à une malnutrition et un retard de croissance puisque dans le milieu naturel, les huîtres se ferment en cas de contrainte ou de menace.

Le plancton

Le plancton se situe à la base des chaînes trophiques* aquatiques et en particulier marines. Ce terme regroupe de très nombreux organismes de petite taille qui vivent à l'état larvaire ou adulte en suspension dans l'eau, sans pouvoir s'orienter indépendamment des courants, et qui se divisent en phytoplancton et zooplancton*. Le phytoplancton ou plancton végétal est composé d'algues qui sont presque toutes unicellulaires, dont se nourrit notamment le zooplancton* ou plancton animal. Nombre d'espèces multicellulaires se nourrissent de plancton, à commencer par les petites espèces de poissons, mais aussi nombre d'invertébrés* marins. De très grandes espèces sont aussi concernées : c'est le cas des mysticètes*, qui se nourrissent dans de nombreux cas du krill* filtré grâce à leurs fanons.

Il semble qu'un certain nombre des espèces qui constituent le plancton soient sensibles au bruit ambiant. C'est ce que laisse penser l'étude menée par R.D. McCauley et al. (2017). Cette étude a en effet porté sur les effets de l'usage des canons à air sur le zooplancton*. Il en ressort que les ondes sonores produites par les fusils à air comprimé impliquent une baisse importante de l'abondance de zooplancton* selon les mesures expérimentales effectuées par

sonar*, à la fois sous ses formes adultes et larvaires. L'effet a été observé jusqu'à 1,2 km du canon à air et la mortalité des larves planctoniques est particulièrement importante.

Cette étude tendrait à prouver que le bruit anthropique déstabilise les chaînons de base des écosystèmes* aquatiques et qu'il pourrait par conséquent jouer un rôle de perturbation en cascade sur l'ensemble de leurs chaînes trophiques*.

LES MILIEUX TERRESTRES

Introduction

Nous avons déjà mentionné que le milieu terrestre implique une propagation des ondes sonores principalement dans l'air à une vitesse de 340 m/s. L'unité de référence est le dB réf.20μPa, en référence au seuil d'audition humain (voir page 9).

Les paysages sonores des milieux terrestres sont probablement plus diversifiés encore que ceux des milieux marins, ceci parce que ces milieux sont moins homogènes que ceux des mers et des océans. Ils se répartissent en une dizaine de grands types de biomes* et en des centaines voire des milliers de types d'écosystèmes* dont les caractéristiques et les peuplements d'animaux, en particulier, diffèrent énormément selon les conditions biotiques* et abiotiques*. On compte ainsi parmi les milieux terrestres à la fois la mangrove, les forêts tempérées et tropicales, la toundra, les déserts glacés et arides, etc., qui sont peuplés par des espèces particulièrement adaptées à leurs différentes niches écologiques* et qui émettent lorsqu'elles y sont sujettes autant de signaux sonores différents. Sans même compter le fait que les phénomènes abiotiques* peuvent dans certains cas contribuer fortement à ces paysages sonores : c'est notamment le cas du bruit produit par le vent, mais aussi localement par l'eau et par les phénomènes météorologiques et volcaniques.

Dans les milieux terrestres, qui représentent un tiers de la surface de la Terre, les sources de pollution sonore se sont multipliées encore plus précocement que dans les océans, où le début des nuisances date pour l'essentiel de la motorisation des navires, qui s'est généralisée depuis la fin du XIXe siècle. De façon générale, le degré de nuisance est proche de celui de l'urbanisation, les villes étant des lieux où se concentrent à la fois la population, les activités et les transports terrestres.

Les sources de pollution sonore propres aux milieux terrestres sont très variées. Du point de vue des désagréments causés aux êtres humains, les sources issues de voisinage arrivent en premier lieu, à un niveau sensiblement égal aux nuisances causées par

les transports. En France, la réglementation sur le bruit dans l'environnement s'intéresse essentiellement à ces dernières ainsi qu'aux nuisances sonores causées par l'industrie.

Ceci étant, le panel d'activités à prendre en compte pour appréhender l'effet du bruit sur la biodiversité terrestre est bien plus large. Il comprend bien entendu les émissions sonores liées aux transports routiers, ferroviaires et aériens, qui sont très présentes sur une vaste partie des territoires, mais aussi celles qui sont causées par les chantiers, l'exploitation des mines et celles des carrières, l'industrie ou encore l'exploitation forestière. En ville, il faut y ajouter les nuisances sonores liées aux quartiers festifs et animés, notamment en période nocturne. Pour la biodiversité, les nuisances liées au voisinage (bruits de pas, conversation, musique, etc.) sont en revanche sans doute moins importantes que pour les êtres humains puisque l'essentiel de ces types de sons se propage directement de logement en logement, à tout le moins dans l'habitat collectif.

Dans les milieux terrestres, le son se propage aussi à de grandes distances, et une source de pollution sonore peut avoir des effets à d'importantes échelles géographiques : il a ainsi été reconnu que le bruit produit par une route impacte négativement la densité de population d'oiseaux jusqu'à une distance de 1,5 km au moins ; les mammifères, dont l'ouïe est souvent excellente, étant concernés jusqu'à cinq kilomètres de l'infrastructure. De la même façon, le bruit engendré par le battage de pieux peut affecter la faune sauvage terrestre jusqu'à une distance de 1,6 km. Dans ce contexte, plusieurs études tendent à montrer que les espèces « généralistes » résistent mieux aux perturbations apportées par le bruit que les espèces plus spécialisées, qui sont inféodées à une niche écologique* particulière.

Les caractéristiques des bruits produits par les différents modes de transports sont assez différentes. Le bruit routier est assez continu dès lors que le trafic est important et présente essentiellement des fréquences* inférieures à 1500 Hz, le son produit par les poids-lourds étant de tonalité assez grave. Le bruit routier est essentiellement produit par le contact des pneus sur la chaussée à partir d'une vitesse de 50 km/h environ. Ces bruits de roulement sont aussi la composante majeure du bruit ferroviaire à compter de cette vitesse, les fréquences* pouvant être plus aiguës : mais surtout, il est fortement intermittent, donnant lieu à des pics de bruit. Le bruit provenant des avions est quant à lui également intermittent et fortement localisé autour des plateformes aéroportuaires, aérodromes et héliports, du moins en ce qui concerne les survols à basse altitude, qui sont les plus émetteurs de nuisances. Les bruits industriels sont quant à eux de types très variés et

sont généralement assez localisés.

Comme sous l'eau et sur les côtes, les conséquences de cette pollution sonore sur le monde vivant sont variées : augmentation du temps de surveillance de l'environnement, diminution du temps consacré à l'alimentation, problèmes de reproduction, évitement chronique de certaines zones, plus grandes difficultés en termes de prédation et de vigilance face à celle-ci, etc. Comme pour le milieu maritime, nous les abordons ci-dessous par grands types de taxons* tout en approfondissant certains exemples.

Les mammifères terrestres

Dans les milieux terrestres, les quelque 5500 espèces de mammifères forment un cortège d'espèces présentes dans la quasi-totalité des types d'écosystèmes*, depuis les déserts secs jusqu'à la banquise. De tailles et de poids très différents d'une espèce à l'autre (de deux grammes pour *Suncus etruscus* jusqu'à plus de six tonnes pour l'Éléphant de brousse d'Afrique), les mammifères terrestres sont ainsi exposés à des environnements sonores extrêmement variés.

Sur terre comme en mer, l'ouïe des mammifères est la plus performante. Dans la plupart des cas, leur audition s'étend de quelques dizaines de Hertz* à 50 kHz. Certains, et en particulier les chiroptères*, peuvent percevoir les sons jusqu'à 150 kHz et utilisent le sonar* pour se repérer dans l'espace et identifier leurs proies. L'ouïe des primates non humains et des mammifères carnivores s'étend souvent jusqu'aux ultrasons*. Dans l'ensemble, le seuil d'audition est proche de 0 dB, mais certaines espèces de mammifères perçoivent le son dès -20 dB.

Chez les mammifères terrestres, les fonctions de la communication sonore sont très variées, tout comme chez leurs cousins aquatiques : alerte face à un prédateur, communication au sein du groupe, parade nuptiale, recherche de nourriture, identification des proies, etc. Les signaux émis sont parfois modulés de façon très précise. Ainsi, certaines espèces de singes communiquent couramment de façon sonore et sont capables de différencier leurs cris en fonction des situations à appréhender. Les singes Vervet utilisent de la sorte différents cris d'alarme selon le type de danger. Selon ces modulations, les individus se réfugieront dans les arbres en cas de présence d'un léopard, mais ils se protégeront en rejoignant les bosquets en cas de menace de la part d'un aigle ; et en cas de présence d'un serpent dangereux, les singes procéderont à un attentif examen du sol.

L'impact de la pollution sonore sur les mammifères terrestres a jusqu'à présent été un peu bien moins étudié que celui qui concerne les oiseaux. Pour autant, un certain nombre d'éléments sont bien

connus. Une part importante des mammifères terrestres sont plutôt nocturnes, avec une préférence marquée pour l'aube ou le crépuscule, et les signaux sonores sont d'autant plus importants pour ces espèces que toutes ne sont pas dotées d'une excellente vision.

Comme celui de l'homme, leurs systèmes auditifs sont particulièrement bien étudiés – les mammifères terrestres disposant d'oreilles externes, moyennes et internes –, et une série d'atteintes à ces systèmes a été documentée en cas d'exposition à des niveaux sonores excessifs : les pertes d'auditions temporaires ou définitives ne sont pas exceptionnelles dans ces situations, en particulier chez les animaux d'élevage ou vivant dans des parcs zoologiques.

Un certain nombre d'études, dont certaines seront citées ci-dessous, tendent aussi à montrer que l'exposition chronique de mammifères au bruit implique des problèmes de développement des systèmes non auditifs et un niveau de stress* surélevé, comme cela a aussi été prouvé chez certains oiseaux : les études allant en ce sens ont essentiellement été menées sur des souris et des rats en laboratoire, et aussi chez des mammifères présents dans les élevages et dans les zoos. Ce type d'atteintes concerne aussi le fonctionnement et le développement du cerveau, tout comme les troubles du sommeil, connus chez l'ensemble des animaux pour entraîner des troubles métaboliques*.

Au-delà et comme chez d'autres taxons animaux, les impacts des bruits anthropiques sur les mammifères terrestres affectent essentiellement leurs comportements, ce qui induit des effets négatifs sur leur conservation, leur santé, leur bien-être et leur capacité reproductive. Nombre d'espèces réagissent au masquage provoqué par la pollution sonore en ajustant leurs productions sonores pour le compenser. En ce qui concerne spécifiquement les animaux sauvages, un certain nombre d'études comportementales ont été menées en réponse au bruit routier, mais aussi dans certains cas aux bruits industriels ou de loisirs.

Les rongeurs

Plusieurs expériences ont été menées sur les rongeurs in situ et en laboratoire. L'une d'elles concerne le Chien de prairie et a donné lieu à un projet de recherche de la part de G. Shannon et al. (2014). Il s'agit d'une espèce-clé des prairies nord-américaines. Ces gros rongeurs sont sociaux, vivent dans de fortes densités et leurs échanges reposent essentiellement sur la communication vocale.

L'expérience montre que cette espèce a notamment défini des réponses comportementales de vigilance face aux prédateurs et que celles-ci sont modifiées par les perturbations humaines. Les chiens de prairie

étudiés vivent dans de grandes plaines herbeuses sèches planes ou légèrement ondulées dans l'État du Colorado (États-Unis). Deux colonies recouvrant chacune environ dix hectares et vivant à cinq kilomètres l'une de l'autre ont été étudiées dans le cas de perturbations humaines restreintes : seuls les chercheurs et les gestionnaires des terres agricoles ont eu accès aux sites concernés durant l'expérience.

Pour mener l'expérience, le bruit produit par les voies de la *route Interstate 25* a été enregistré et reproduit dans les deux colonies étudiées. Ce bruit atteignait 77 dB(A) LAeq à 14 mètres des voies et a été restitué à un niveau sonore équivalent à 115 mètres du centre du territoire de chaque colonie étudiée. Dix expériences de diffusion ont ainsi été menées dans chacune d'entre elles du mois de juin au mois d'août 2013. Le niveau sonore reçu au centre de la colonie pendant le traitement était de 48 à 58 dB(A), contre 26 à 38 dB(A) pour le niveau d'ambiance naturel avant et après traitement.

Dans ce contexte, deux expériences ont été réalisées chaque semaine avec au minimum 48 heures d'écart entre les diffusions de son. Après une heure de diffusion, un temps de relaxation de 25 minutes a été respecté avant des périodes d'observation des comportements d'une durée d'une heure. Il en ressort les principaux résultats suivants :

- Après l'exposition au bruit, le nombre de chiens de prairie visibles diminue de 21 %, les animaux ayant davantage tendance à rester sous terre.
- Le nombre d'individus en quête de nourriture a baissé de 18 %.
- Le nombre de comportements de vigilance a augmenté de 48 %.
- Le nombre de comportements sociaux et de repos a diminué de moitié.

Il est donc très probable que le bruit routier perturbe de façon importante et négativement le comportement des chiens de prairie.

En parallèle, trois études récentes ont été menées en laboratoire chez le rat (Cui et al., 2015, Gai et al., 2016 et Vasilyena et al., 2017). À chaque fois, les résultats obtenus chez les rongeurs testés ont été comparés à un groupe témoin non exposé au bruit.

La première étude porte sur des individus exposés pendant quatre heures par jour pendant 28 jours à un bruit blanc d'une intensité de 100 dB, et montre que la population exposée continue de produire de façon persistante un surdosage du peptide AB, qui est impliqué dans les pathologies de type Alzheimer en raison de la surexposition du gène codant pour ce peptide et pour les enzymes associés. Cela signe le fait que l'exposition chronique au bruit pourrait accélérer les pathologies du type Alzheimer, ceci en raison de l'installation progressive d'un état inflammatoire cérébral.

La deuxième expérience porte sur des rats exposés pendant quatre heures par jour pendant 28 jours à un bruit blanc d'une intensité de 100 dB, qui montre chez les sujets exposés une dérégulation persistante du métabolisme* glucidique, une activation persistante de molécules contribuant à la résistance à l'insuline, ainsi que l'installation d'un état inflammatoire et une altération de la flore intestinale. Ces modifications indiquent que l'exposition chronique à un bruit de 100 dB favorise le développement de syndromes métaboliques* tels que l'obésité et le diabète.

La troisième expérience menée sur des rats repose sur l'exposition d'un groupe soumis pendant 13 semaines à des sons de 120 et 150 dB cinq fois par jour. Il en ressort une apoptose* massive et de nombreuses aberrations chromosomiques de la moelle osseuse.

Chez le rat, ces expériences confirment donc que l'exposition chronique à un bruit fort entraîne d'importantes dérégulations du rythme circadien* central et périphérique, donc de profondes dégradations métaboliques*.

Les chiroptères*

Parfois peu efficaces dans le domaine visuel, les chiroptères* utilisent de façon très courante leur ouïe à des fins de détection, d'identification, de localisation et de communication. Certaines espèces de chauves-souris utilisent même l'écholocalisation* : elles se repèrent alors à partir de l'écho des ondes sonores qu'elles projettent elles-mêmes dans le domaine des ultrasons* pour se diriger dans l'espace et pour identifier leurs proies.

Dans certaines conditions, le bruit anthropique peut camoufler le bruit des proies des chauves-souris ou, pire, entraîner une destruction de leurs conduits auditifs. Cette pollution provoque une augmentation du temps de localisation des proies et donc de chasse, phénomène également observé chez les oiseaux rapaces. Ainsi, en cas de pollution sonore, la Chauve-souris blonde américaine met trois fois plus de temps pour localiser ses proies durant la nuit. Quant au Grand murin, il réduit d'un quart la surface qu'il prospecte pour chasser en cas de bruit inopportun.

J.P. Bunkley et al. (2014) se sont intéressés à l'effet du bruit produit par les compresseurs de gaz sur plusieurs espèces de chiroptères* qui pratiquent l'écholocalisation*, ceci en comparant le comportement vocal de cinq espèces (*Tadarida brasiliensis*, *Myotis californicus*, *Myotis cillolabrum*, *Myotis lucifugus* et *Parastrellus hesperus*) soumises à la pollution sonore produite par ces équipements à celui de ces mêmes espèces dans des lieux préservés de cette nuisance.

Selon les résultats obtenus en plein air, l'activité de la première espèce citée est de 40 % inférieure dans les lieux bruyants par rapport aux lieux calmes, et le bruit ambiant influe donc potentiellement sur son aire de répartition. De plus, *Tadarida brasiliensis* modifie ses appels d'écholocalisation* en produisant des appels plus longs situés dans une bande de fréquence* plus restreinte. Il apparaît que les quatre autres espèces étudiées ne sont pas globalement affectées par le bruit ambiant. Pour autant, les appels d'écholocalisation* sont perturbés par le bruit des compresseurs à gaz chez les espèces qui utilisent à ce titre des fréquences* inférieures à 35 kHz, alors que les espèces qui ont recours à des fréquences* plus élevées ne font pas preuve d'altération de leurs comportements d'émission.

Les oiseaux

Les oiseaux sont sans aucun doute les animaux les plus étudiés en termes de bioacoustique, d'éco-acoustique et d'impacts de la pollution sonore. Environ la moitié des études de ce type les concernent et il s'agit certainement du taxon* terrestre pour lequel les conclusions obtenues sont les plus précises. Les travaux sont en particulier nombreux en ce qui concerne les effets du bruit routier et du bruit urbain. Ces études ont été menées à la fois en situation réelle et en laboratoire et portent sur le comportement, sur la physiologie et sur l'écologie des oiseaux.

Les oiseaux possèdent des organes vocaux parfois très évolués, puisqu'ils possèdent, à la jonction entre la trachée et les bronches, un syrinx* qui est activé par un nombre variable de muscles, selon les espèces. Nombre d'oiseaux chanteurs possèdent ainsi sept paires de muscles qui leur permettent de moduler leurs chants de façon très fine, la complexité du chant étant fonction du nombre de ces muscles. La fréquence* dominante des émissions acoustiques d'une espèce d'oiseau est d'autant plus basse que sa masse corporelle est élevée, règle qui vaut d'ailleurs pour les autres espèces animales. À noter aussi que toutes les espèces n'exploitent pas forcément toutes les potentialités d'expression dont elles sont capables : le Corbeau est ainsi apte à imiter la voix humaine aussi bien que les perroquets, mais se trouve rarement en situation de le faire.

Les fonctions de l'expression sonore des oiseaux sont très nombreuses et sont notamment essentielles dans les stratégies de défense du territoire et de reproduction, voire de maturation sexuelle. Les colombes doivent ainsi roucouler pour que leurs follicules ovariens se développent. Mais il faut aussi compter avec des fonctions telles que la détection des autres espèces, la reconnaissance entre parents et progéniture et entre partenaires, la reconnaissance des voisins et des étrangers, la

diffusion de signaux de faim, de détresse ou d'alarme.

Chez les oiseaux, le chant – long et complexe – est essentiellement destiné à des fins de reproduction et est généralement l'apanage des mâles qui attirent ainsi les femelles à des fins d'accouplement et de formation de la nichée. Enregistré et ralenti, le chant des oiseaux se révèle souvent d'une très grande subtilité : ainsi, une alouette qui grisolle en volant émet environ 400 sons distincts par seconde. La rapidité de modulation du syrinx* est de la sorte bien supérieure aux capacités d'analyse de l'audition humaine.

Selon les espèces, le chant des oiseaux est inné ou acquis, faisant dans ce deuxième cas l'objet d'un apprentissage. Parmi les quelque 9000 oiseaux connus figurent environ 5400 passereaux (oiseaux qui se perchent), qui sont répartis entre les oscines* et les subsoscines*. Les oscines*, qualifiés d'oiseaux chanteurs, sont capables d'apprendre leurs vocalisations à des degrés variables de leur développement, un certain nombre d'espèces étant capables de modifier leur répertoire chaque printemps. À l'inverse, les chants font partie du patrimoine génétique de l'espèce chez les subsoscines*. La plupart des oiseaux qui ne font pas partie des passereaux ne chantent pas, sans pour autant être muets, et ils ne sont pas capables d'apprentissage.

Le cri des oiseaux, bref et simple, a d'autres fonctions que le chant : avertir de la présence d'un prédateur et surveiller les alentours en conséquence, voire préparer les stratégies de lutte et de rejet de ce(s) prédateur(s). Il est émis par les mâles comme par les femelles tout au long de l'année et est modulé en fonction des situations : chez certaines espèces, le cri d'alerte en cas de détection d'un prédateur est bref et aigu afin d'éviter que celui-ci ne repère le crieur, mais il sera plus rauque et criard si le danger n'est pas immédiat : dans ce cas, il est possible qu'il contienne des informations directionnelles qui permettent au groupe de se rassembler pour assaillir le prédateur.

Hormis ces fonctions de base, l'utilisation des signaux vocaux par les oiseaux est très étendue, y compris au niveau interspécifique. Il arrive ainsi que les cris de signalement d'un prédateur émis par une espèce d'oiseau soient interprétés avec profit par les individus d'autres espèces. Par ailleurs, il a été démontré que le Diamant mandarin du désert australien utilise les signaux vocaux pour répartir les soins des deux parents vis-à-vis de leur descendance.

L'émission sonore est une fonction vitale pour les oiseaux, qui y consacrent une part importante de l'énergie dont leur métabolisme* dispose. Ainsi, chez le Troglodyte de Caroline, le chant représenterait de 10 à 25 % du budget énergétique. Les fréquences*

entendues par les oiseaux se situent au-dessus de 100-250 Hz et l'audition cesse vers 10 kHz.

Sauf exception, la sensibilité maximale de l'audition des oiseaux se situe entre 1 et 5 kHz. Leur oreille est ainsi moins sensible que celle des mammifères et leur seuil d'audition est généralement compris entre 5 et 15 dB. Les rapaces possèdent l'ouïe la plus fine parmi les oiseaux et certains d'entre eux peuvent détecter des bruits très faibles de l'ordre de - 15 dB. L'organe auditif des oiseaux est généralement capable de déceler des sons bien plus aigus et bien plus grave que les sons émis par chaque espèce, ce qui montre que les oiseaux sont à l'écoute de leur environnement.

Le bruit anthropique peut provoquer de nombreuses réactions et modifications chez les oiseaux, en fonction notamment des espèces ainsi que du milieu de vie.

La conséquence la plus flagrante concerne la modification des fréquences* de chants en milieu bruyant. Tous les oiseaux ne sont cependant pas en capacité de modifier ces fréquences*, car seuls ceux qui utilisant des fréquences* moyennes peuvent les faire : les autres ont alors souvent tendance à diminuer la cadence de leur chant ou à modifier leur puissance acoustique. Un autre type de réaction face à un environnement bruyant est la fuite vers des lieux plus calmes.

Il résulte de l'exposition des oiseaux au bruit des troubles variés, à commencer par des problèmes rencontrés dans les stratégies de reproduction : par exemple, les mâles des bruants des roseaux exposés à la pollution sonore restent plus souvent sans femelles, soit parce que celles-ci évitent les zones bruyantes, soit parce que les mâles restés dans ces zones sont moins attirants.

Une équipe de chercheurs de l'université de Leiden (Pays-Bas) a étudié le comportement vocal de la Mésange charbonnière dans des environnements bruyants de cette ville. Cette espèce fait partie de celles qui adaptent leur chant en fonction du bruit ambiant. La ville de Leiden est marquée par des niveaux de bruit très différents entre quartiers résidentiels calmes et zones d'intense trafic routier : le niveau sonore moyen se répartit ainsi entre 42 et 63 dB selon les zones qui ont fait l'objet de l'étude. Le chant de 32 mésanges charbonnières mâles a été analysé, et il en ressort que l'énergie sonore est davantage répartie dans ses fréquences* graves chez les oiseaux vivant dans les zones bruyantes, mais aussi que la moyenne de la fréquence* la plus grave utilisée par la mésange est d'autant plus élevée que l'environnement est bruyant. En bref, la mésange chante plus haut si le bruit ambiant est élevé.

S'il est possible que les individus génétiquement déterminés à chanter plus aigu se localisent dans les

zones les plus bruyantes au gré d'un processus de sélection par essais et erreurs, il est aussi notable que l'espèce acquiert son chant par apprentissage, et qu'il est donc plus probable que les mésanges charbonnières ajustent leurs façons de chanter au milieu sonore plutôt que de choisir leur territoire en fonction des caractéristiques individuelles de leur chant. Des études ultérieures ont confirmé les résultats obtenus à Leiden à travers toute l'Europe et notent que la structure du chant de la Mésange charbonnière est de plus différente selon que l'espèce vit en ville ou ailleurs. D'autres travaux ont montré une sensibilité comparable pour deux espèces communes de l'Ohio (États-Unis) – le Cardinal rouge et le Merle d'Amérique – ainsi que pour le Merle noir européen ou encore le Bruant chanteur.

Une étude menée par des chercheurs de l'Université de Western Ontario (Canada) confirme l'impact du bruit urbain sur le comportement et la physiologie d'une espèce d'oiseau, le Pinson zébré. Un groupe d'oiseaux de cette espèce a été placé en captivité et réparti en des sous-groupes soumis ou non à un bruit urbain durant la nidification. Il en ressort que les oisillons continuent à apprendre le chant de leurs parents, mais que ceux qui sont exposés au bruit présentent des problèmes de syntaxe : s'ils reproduisent bien les sons émis par leurs parents en ce qui concerne les syllabes du chant, ils commettent des erreurs dans l'ordre de leur production, ce qui pourrait avoir des conséquences sur leur futur succès reproductif. La même équipe a d'ailleurs démontré que les oisillons exposés au bruit urbain présentaient un taux d'hormones de stress* plus élevé que les autres et que deux zones de leurs cerveaux cruciales pour l'apprentissage et la production des chants étaient sous-développées par rapport à celles des oisillons non exposés.

Il faut remarquer que l'augmentation des fréquences* utilisées par les oiseaux mâles lors de leur chant peut être associée à d'autres réactions. Chez un certain nombre d'espèces, les mâles les plus expérimentés chantent normalement en utilisant les fréquences* les plus basses possible pour attirer les femelles : lorsqu'ils utilisent des fréquences* plus élevées, les femelles ne les choisissent plus, ce qui a un impact sur la qualité de la reproduction et de la descendance. Par ailleurs, lorsque le chant des oiseaux devient moins nuancé et que le nombre de répétitions du message augmente pour contrer le bruit ambiant, les dérèglements induits augmentent le risque de prédation et puisent de l'énergie.

À noter aussi que pour ne pas être dérangés par le bruit anthropique, certains oiseaux commencent à chanter au printemps avant l'aube, qui est normalement le moment privilégié du chant pour la plupart des espèces. Le bruit anthropique entraîne

donc un décalage de l'horloge biologique. Ce décalage a même été observé chez le Rouge-gorge dans la ville de Sheffield (Grande-Bretagne), qui préfère chanter de nuit pour défendre son territoire : les vérifications effectuées confirment que cette adaptation n'est pas due à l'influence de la lumière nocturne en ville.

Une autre expérience montre une diminution du succès de chasse chez certains rapaces. Ainsi, J. T. Mason et al. (2016) ont montré que pour une augmentation du bruit ambiant de 1 dB, les hiboux nyctales rencontrent une probabilité de - 8 % pour le succès de la chasse, de - 11 % pour la probabilité de détection des proies et de - 5 % pour la probabilité de comportement de frappe. Cette conclusion a été apportée après la capture de 31 hiboux à l'état sauvage placés dans une tente de vol et mis face à des proies distantes de 50 à 800 mètres d'une station de compression de gaz naturel (émission de bruit de 46 à 73 dB).

Du point de vue physiologique, un certain nombre d'effets sur les oiseaux ont aussi été documentés de façon solide. On notera tout d'abord que dans certaines situations, le stress* engendré par le bruit peut déboucher assez directement sur la mortalité. Ainsi, les galliformes présents en montagne (Grand tétras et Lagopède alpin) disposent durant la période hivernale de réserves grasses tout juste suffisantes pour attendre le retour du printemps. En cas de bruit signalant la présence d'humains, le stress* et les comportements de fuite associés engendrent une dépense énergétique inutile et dangereuse qui peut conduire à la mort des individus. C'est pour cela que des organismes tels que le Parc national des Pyrénées occidentales, mettent en place des zones de quiétude hivernales afin d'éviter que les randonneurs dérangent les espèces en question.

Un stress* chronique dû au bruit ambiant a également été relevé chez le Gobe-mouche et le Merle bleu des États-Unis lors d'une expérience qui a aussi montré que l'exposition au bruit implique une perte d'efficacité des signaux acoustiques.

En parallèle, des chercheurs ont relevé dans certains cas un impact négatif du bruit sur l'abondance de la ponte, sur la taille des œufs, ainsi que sur la croissance des plumes et la taille du corps chez les jeunes oiseaux : si le bruit a un impact positif sur la croissance des plumes et du corps jusqu'à un certain stade (70 dB), le développement est fortement ralenti au-delà selon N. J. Kleist et ses collaborateurs (2018) pour les merles de l'ouest, les merles de montagne et les moucherolles à gorge cendrée, qui sont soumis au bruit d'activités extractives : ces oiseaux exposés sont ainsi soumis à des facteurs de stress* chronique qui entraînent une perturbation de glucocorticoïdes et une réduction de leur condition

physique.

Une autre étude menée par A. Meillère et al. (2015) concerne les moineaux domestiques. Selon cette étude conduite auprès d'oisillons d'un âge de neuf jours, la longueur de leur télomères* semble affectée par l'exposition au bruit. L'étude a porté sur 21 nichoirs exposés à la circulation routière (63 dB(A) en moyenne) et sur 46 nichoirs exposés à un bruit de fond rural (43 dB(A) en moyenne). Elle a porté de la période de reproduction et de naissance des oisillons jusqu'à la fin de la période d'élevage des jeunes. Le relevé de la longueur des tarse* et des becs, ainsi que la mesure de la longueur des ailes, la pesée des individus et la réalisation de prélèvement de sang (mesure du taux de corticostérone* et de la longueur des télomères*) ont montré que le développement des jeunes était retardé par la présence de bruit, et que les télomères* de ces jeunes étaient raccourcis par rapport à ceux de leurs parents. La non-variation du taux de corticostérone* montrerait que la diminution des télomères* chez les jeunes ne serait pas dû à une hormone de stress*.

En termes d'écologie des oiseaux, plusieurs études démontrent par ailleurs une relation étroite entre l'augmentation du bruit ambiant et la diminution de la densité des oiseaux nicheurs. Dans les îles de la Frise (mer du Nord), les bruits liés à des exercices de tir militaire ont fait disparaître totalement les repaires de bécasseaux maubèches et les chevaliers se sont reportés sur des repaires plus tranquilles.

Ce type de comportement a été confirmé dans le cadre de l'exploitation du gaz et du pétrole aux États-Unis : le seul changement environnemental à distance apporté par cette exploitation concerne la production de bruit et il est donc assez simple d'organiser des expériences confrontant des zones bruyantes avec des parcelles témoins qui sont demeurées calmes. Chez la Paruline couronnée, passereau des tourbières et forêts boréales, les succès reproductifs de l'espèce sont réduits en présence de bruit, puisque les individus les plus expérimentés sélectionnent de préférence les parcelles témoins silencieuses pour établir leurs nids ; la densité des passereaux est plus élevée de 50 % dans les zones témoin.

Ces résultats sont confirmés par une étude conduite au Nouveau Mexique (États-Unis) à propos des effets du bruit d'installations d'extraction, qui est stable et permanent et qui présente un spectre assez large : il en résulte dans les zones exposées une baisse de la richesse spécifique chez 21 des 32 espèces étudiées, le bruit modifiant l'équilibre entre les espèces, notamment parce que les prédateurs de nids évitent les zones les plus bruyantes.

Un certain nombre d'études portant sur les oiseaux indique donc que le bruit entraîne des effets

significatifs sur le fonctionnement et l'équilibre des écosystèmes*. Enfin, il apparaît clairement que les oiseaux désertent les lieux bruyants tels que les bordures de routes, ce qui implique une modification de la quantité d'habitats pour les oiseaux migrateurs. Selon l'expérience menée par J. W. McClure et al. (2013), il a été possible d'isoler l'effet du bruit d'une route indépendamment des autres pollutions engendrées par cette infrastructure. L'expérience est notable et a pu permettre d'isoler le bruit des pollutions visuelles et chimiques apportées par la route, puisque le test a été mené en simulant par des haut-parleurs l'effet sonore d'une voirie routière.

Dans l'État de l'Idaho (États-Unis), une route fantôme a ainsi été simulée par l'équipe de J. W. McClure et al. (2013) grâce à des moyens de diffusion sonore artificielle au sein d'un site d'escale migratoire d'oiseaux. Le protocole a mis en place quatre jours de bruit suivis de quatre jours de silence, les périodes de bruit durant de 4h30 à 21h00. Les comptages effectués ont ciblé les oiseaux migrateurs, plus sensibles aux conditions d'accueil du site et plus représentatifs de sa diversité biologique. En tout, plus de 8000 oiseaux ont été détectés pour 59 espèces, 22 espèces ayant été signalées plus de 50 fois. Il ressort de l'étude que l'abondance des espèces change en fonction des périodes, le nombre d'oiseaux étant globalement de 28 % plus faible en présence de bruit routier. La quasi-totalité des espèces d'oiseaux semble éviter cette source de bruit, puisque le nombre d'individus relevés est moindre en présence de celle-ci.

Les amphibiens* et les reptiles

Les données sur les effets du bruit sont moins abondantes pour les amphibiens* que pour les oiseaux, mais elles tendent néanmoins à se multiplier pour ce taxon*. La classe des amphibiens* est la classe des vertébrés* la plus menacée sur terre : 42 % des espèces existantes de ce groupe sont en effet classées parmi l'une des trois catégories de risque d'extinction élevé de l'Union internationale pour la conservation de la nature.

Les amphibiens* sont généralement très bien adaptés à la perception de sons aériens et percevraient les sons entre 100 Hz et 4 kHz environ. Leur seuil d'audition se situe entre 20 et 40 dB avec le maximum de sensibilité entre 400 et 900 Hz. Outre leurs systèmes auditifs proprement dits, les parois latérales du corps et les poumons peuvent aussi servir dans un certain nombre de cas de voies de réception des sons.

Les amphibiens* privilégient de façon générale la communication acoustique sur les autres modes de communication : du fait que leur tête est généralement très proche du sol, les informations

d'origine visuelle sont chez eux très parcellaires. Cette communication est particulièrement stratégique lors de la période de reproduction, lorsque les femelles utilisent les chants des mâles pour les repérer dans l'espace, au printemps. À tel point que la capacité de reproduction dépend pour ainsi dire entièrement de la bonne capacité de ces animaux à émettre et à percevoir ces chants dans de bonnes conditions.

Le bruit anthropique, et en particulier routier, peut donc avoir de nombreuses conséquences sur les amphibiens* : en Thaïlande, une étude a ainsi montré que le bruit engendré par les véhicules motorisés affecte la perception du chant de plusieurs espèces de grenouilles et diminue de la sorte leur succès reproducteur (J. W.C. Sun et P. M. Narins, 2004).

Au Brésil, V. Zaffaroni Caorsi et al. (2017) ont exposé des individus mâles de deux espèces de grenouilles (*Boana bischoffi* et *Boana leptolineata*) à des enregistrements de bruit de trafic routier à des intensités de 65 et 75 dB. L'étude montre que chez ces deux espèces, les caractéristiques du chant sont affectées par la pollution sonore. Chez la première, l'intensité de l'appel à la vigilance est en baisse et la fréquence* dominante utilisée a été revue aussi à la baisse sur l'ensemble de la période d'exposition. Chez la seconde espèce, la réaction (augmentation ou diminution de l'intensité du chant) dépend du niveau d'exposition ; mais dans les deux cas, les individus soumis au bruit se sont éloignés de la source sonore. Les auteurs de l'étude en concluent que le bruit routier affecte notablement le comportement vocal des amphibiens* anoures* et que son niveau affecte les réponses adoptées par les espèces.

Du point de vue physiologique, une étude poussée a été menée en France sur le dérangement de la Rainette verte, une espèce caractéristique et patrimoniale des milieux humides, par le bruit routier. T. Lengagne et al. (2017) ont dans ce cadre capturé à la main une cohorte d'animaux près de Lyon au début de leur période de reproduction, c'est-à-dire à la fin du mois d'avril. Leur niveau de corticostérone* a alors été relevé, tout comme la couleur de leurs sacs vocaux. Le groupe a ensuite été scindé en deux au laboratoire, les deux sous-échantillons étant soumis à des conditions sonores très différentes. Chez le groupe témoin a été diffusé l'enregistrement de l'ambiance sonore d'une mare, alors que l'autre groupe a été confronté à celui produit par une route nationale.

Dix jours plus tard, les prélèvements effectués ont montré que le taux de corticostérone* des rainettes exposées au bruit anthropique était de plus de 63 % supérieur à celui du groupe témoin, ce qui témoigne d'un niveau de stress* bien plus élevé chez ce sous-groupe. La réaction immunitaire a aussi été testée à partir de l'analyse de la réaction après injection d'un

produit propre dans certaines conditions à entraîner des réponses inflammatoires : il en ressort que les individus exposés au bruit connaissent un recul de la qualité de leur système immunitaire.

Par ailleurs, les sacs vocaux des membres du groupe exposé au bruit ont subi une décoloration. Il en résulte une modification de la sélection des mâles par les femelles, qui s'orientent normalement vers les sujets dont les sacs orange présentent une couleur assez sombre et saturée, porteurs des meilleurs bagages génétiques et propices à une bonne reproduction de l'espèce. Est probablement en cause le fait que les pigments responsables de la coloration des sacs présentent d'autres fonctions, dont la stimulation de la réponse immunitaire : ils auraient ainsi été utilisés à cette fin par les grenouilles exposées au bruit. À noter enfin que des tests complémentaires menés sur un troisième groupe de rainettes vertes a permis de vérifier que les mécanismes du stress* sont bien à l'origine des perturbations constatées en raison de l'exposition à la pollution sonore.

Chez les reptiles, les études sont peu nombreuses. Seuls quelques groupes de ce taxon* utilisent les sons pour communiquer, en particulier les geckos et les crocodiliens. Les geckos sont sensibles à des fréquences* allant de 200 à 5000 Hz. Une expérience a été menée en laboratoire sur le lézard *Tiliqua scincoides*, qui a été exposé lors de celle-ci à des enregistrements de bruit de machines extractives telles que les bulldozers : Mancera et al. (2017) ont relevé à cette occasion que les individus soumis au bruit anthropique passaient plus de temps prostrés, la tête orientée vers le bas, ce qui a été interprété par les auteurs comme une réaction au stress*.

Les alligators et les crocodiles utilisent quant à eux un répertoire vocal assez large pour assurer leur communication à courte et longue distance. Les jeunes s'en servent notamment pour susciter le contact ou signifier la détresse ou la peur. Les adultes utilisent quant à eux leurs productions vocales plus particulièrement à la saison des amours. Ces animaux qui vivent à la fois sur terre et dans l'eau pourraient être affectés par les sources de pollution sonore dans ces deux milieux.

Enfin, certaines espèces de tortues détectent les sons dans des fréquences* pouvant aller de moins de 100 Hz à 2000 Hz, les tortues marines pouvant probablement être incommodées par les bruits aquatiques. Chez la tortue amazonienne de rivière *Podocnemis expansa*, Ferrera et al. (2014) ont démontré que les vocalisations à basses fréquences* (de 95 Hz à 460 Hz environ) sont utilisées par l'espèce pour réguler les relations sociales, ce qui ouvre la voie à de possibles effets des sons anthropiques.

Les insectes et les arachnides*

Un certain nombre d'espèces d'insectes sont dotées du sens de l'ouïe et sont donc plongées dans autant de mondes sonores qui leur sont propres. Certains d'entre eux émettent des sons et sont à ce titre qualifiés d'insectes chanteurs : c'est particulièrement le cas chez les orthoptères (sauterelles, grillons et criquets) tout comme chez les cigales.

Dans une certaine mesure, les fonctions du chant et du sens de l'ouïe sont comparables chez les insectes à celles des mammifères ou des oiseaux : délimitation du territoire, rapprochement des sexes, évitement des prédateurs, etc. Certaines espèces de grillons chantent ainsi lors des combats entre mâles et pour faire la cour aux femelles.

Les insectes ne sont pas munis de cordes vocales. Ceux d'entre eux qui émettent des sons volontairement le font en utilisant certaines des parties dures de leurs corps. Chez les sauterelles et les grillons, la stridulation est produite par le frottement des deux ailes antérieures. Celle du dessous présente une râpe stridulatoire sur laquelle vient glisser l'archet placé sur la face de l'aile du dessus. Chez les criquets, le chant provient du frottement des fémurs des pattes postérieures (celles qui permettent de sauter). Certaines espèces utilisent quant à elles le frottement de leurs mandibules pour émettre des sons audibles à courte distance.

Les systèmes auditifs des insectes sont assez complexes. Ces animaux ne sont pas dotés d'oreilles, les organes de réception du son étant placés selon les espèces et les groupes dans différentes parties du corps. Chez les criquets, le tympan est situé sur l'abdomen, et il se trouve sur les pattes antérieures chez les sauterelles et les grillons. De façon plus générale, les structures qui permettent aux insectes d'être sensibles aux sons font partie de leurs organes mécanorécepteurs propres à leur conférer le sens du toucher, à percevoir les variations de pression de l'air ou de l'eau, à assurer la proprioception et à détecter la gravité. En dehors des organes tympaniques proprement dits, c'est en particulier le cas des organes chordotonaux, souvent présents aussi chez les invertébrés* marins, et qui se situent dans des parties du corps, variables selon les espèces. Chez les moustiques qui utilisent le bruit pour repérer leurs partenaires, ils se trouvent notamment dans les antennes : c'est en particulier le cas chez *Aedes aegypti*, qui serait sensible à des fréquences* allant de 150 à 500 Hz.

Chez les insectes, le seuil d'audition est généralement élevé. Il est par exemple de 40 dB pour les papillons de nuit et de 80 dB pour certaines cigales. Il existe cependant des exceptions, puisque certains moustiques entendent à partir de 0 dB pour des

fréquences* de quelques centaines de Hertz*. Certains papillons de nuit entendraient jusqu'à 100 kHz et même davantage pour contrer le sonar* des chiroptères* dont ils sont les proies : dans certains cas, ces insectes se laissent tomber au sol dès qu'ils perçoivent les émissions sonores de leurs prédateurs. La Fausse teigne est ainsi sensible à des fréquences* pouvant avoisiner 300 kHz, ce qui semble être le record absolu pour la perception des fréquences* élevées dans le règne animal.

Chez un certain nombre d'insectes, l'impact négatif des sons anthropiques semble bien documenté. Comme la plupart des espèces animales, les insectes ont besoin de sommeil et le bruit nocturne diminue sa durée et sa qualité. Comme chez l'homme, le manque de sommeil provoque un contrecoup comportemental et physiologique : accroissement du temps consacré au sommeil le lendemain, diminution des performances comportementales comme la recherche de proies, baisse de fécondité, etc.

Tout comme certains oiseaux et amphibiens*, certains insectes sont amenés à changer leur fréquence* de chant dans un certain nombre de cas. D'après U. Lampe et al. (2012), les criquets mélodieux mâles augmentent le volume de la partie basse fréquence* du chant nuptial pour couvrir le bruit de la circulation, puisque ce bruit masque les signaux dans ce spectre sonore. Dans ces cas, les femelles reconnaissent plus difficilement les mâles les plus expérimentés, ce qui crée un risque pour la reproduction et la survie de l'espèce.

Une expérience a été conduite in situ par Jessie P. Bunkley et al. (2016) dans le Nouveau-Mexique (États-Unis) afin de cerner l'effet du bruit anthropique sur l'abondance et la distribution des arthropodes*. La région de San Juan Basin compte en effet de nombreux compresseurs utilisés pour l'extraction et le transport du gaz naturel. L'étude a porté sur cinq zones soumises au bruit des compresseurs et sur cinq zones plus calmes. Il en ressort que le bruit influence négativement la présence de cinq familles* et d'un genre* d'arthropodes*, et positivement celle d'une famille* de ce type d'insectes. Six familles* et deux genres* n'apparaissent pas affectés par le bruit des compresseurs. Par conséquent, le bruit anthropique affecte une partie importante des insectes concernés par l'étude et modifie la répartition des populations entre les différentes espèces, ce qui est susceptible d'avoir des effets importants sur la régulation et la stabilité des écosystèmes* concernés.

Une autre étude a porté sur une espèce de fourmi, *Myrmica sabuleti*. M.-C. Cammaerts et D. Cammaerts (2018) ont testé en laboratoire l'influence de deux types de bruits – des battements et le son produit par une eau courante – sur la physiologie et le comportement de cette espèce. Parmi les résultats

obtenus, l'étude suggère que l'exposition à des battements débouche sur une plus grande sinuosité des déplacements des fourmis et qu'elle semble induire une moins bonne orientation, une dégradation de la perception tactile, des soins apportés aux jeunes, de la capacité à s'enfuir, voire même des difficultés de cognition et de mémoire à court terme, et une certaine agressivité envers les autres membres de l'espèce. L'exposition au son produit par l'eau courante n'a, quant à elle, engendré aucune de ces conséquences.

À noter par ailleurs que les arachnides* pourraient être perturbés par le bruit ambiant. Cela pourrait être en particulier le cas chez les araignées, qui utilisent les vibrations causées par les ondes sonores pour communiquer entre elles ou pour percevoir les mouvements dans leur environnement.

La flore terrestre

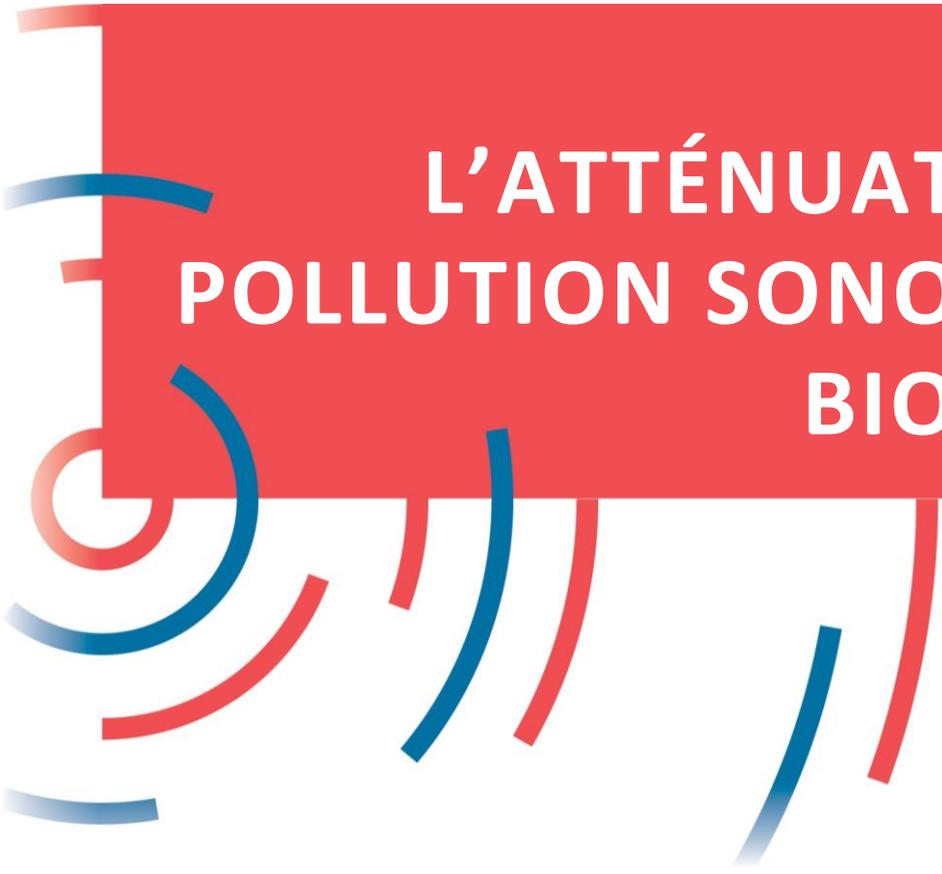
De façon générale, la flore terrestre ne semble pas directement touchée par les ondes sonores, mais elle l'est indirectement par les conséquences du bruit sur la faune. Les forêts voient la diversité de leurs essences diminuer, en particulier parce que certains oiseaux qui ont fui ces espaces ne dispersent plus les graines dont ils se nourrissent. Il peut ainsi s'ensuivre une modification de la répartition des arbres en fonction des mouvements de ces populations d'oiseaux ; et de façon générale, une désertion des lieux bruyants par les oiseaux pollinisateurs* qui entraîne une baisse de pollinisation* dans ces zones.

Chez une espèce de plante pollinisée* par les oiseaux-mouches, la présence de bruit augmente la fréquentation par ces oiseaux en raison de l'éloignement des prédateurs : la plante produit donc davantage de graines. À l'inverse, pour le Pin à pignons (*Pinus edulis*), les sites bruyants sont selon C. D. Francis et al. (2012) marqués par une consommation plus importante des graines par les souris, qui craignent elles aussi moins les prédateurs. La stratégie de reproduction de cet arbre à croissance lente est donc affectée, ce d'autant plus que certains prédateurs des souris contribuent normalement à la dispersion de ses graines dans l'environnement.

Enfin, une étude récente laisse entendre que certaines espèces de plantes pourraient être sensibles directement aux signaux sonores. Une équipe de l'Université de Tel-Aviv (Israël) s'est ainsi intéressée à la réaction de l'Onagre bisannuelle aux sons (M. Veits et al. 2019). Le principal résultat obtenu est que les fleurs de cette plante produisent un nectar plus sucré trois minutes seulement après avoir été exposées au bruissement d'ailes des papillons et des abeilles qui sont ses pollinisateurs*. De plus, cette réponse dépend de la fréquence* du bourdonnement. Ainsi, la concentration de sucre du

nectar n'augmente pas lorsque les fleurs de l'Onagre sont exposées à des sons de fréquence* plus élevée. Il en ressort que les plantes et les insectes qui la pollinisent* se sont probablement mutuellement adaptés pour optimiser leurs relations : la plante

produit du sucre au moment opportun et les insectes favorisent la production du sucre qu'ils recherchent. L'étude laisse aussi apparaître qu'il est probable que les sons anthropiques perturbent ces relations.



PARTIE 2 L'ATTÉNUATION DE LA POLLUTION SONORE PAR LA BIODIVERSITÉ

INTRODUCTION

Les ondes acoustiques se propagent dans l'air, dans l'eau et dans la plupart des matériaux. Entre l'émetteur et le récepteur peuvent se situer tous types de milieux propres à conduire le son ou à en atténuer la propagation (voir page 8).

En fonction des obstacles rencontrés, trois phénomènes propres à réduire le niveau du son chez le récepteur peuvent se produire : l'absorption, la réflexion et/ou la diffraction. Si l'onde sonore rencontre une surface dure, l'essentiel de son énergie est réfléchi. Elle peut l'être dans une direction particulière lorsque le support de réflexion est régulier, mais les directions que suivent les ondes réfléchies sont multiples lorsque la surface de réflexion est irrégulière. En cas de rencontre entre une onde incidente et certains matériaux absorbants (matériaux poreux ou possédant des cavités), une certaine partie de l'énergie sonore est absorbée, l'énergie résiduelle étant réfléchie. En revanche, l'onde sonore incidente est dite réfractée lorsque sa direction change et se multiplie à la faveur de la rencontre avec un obstacle tel que l'arête d'un mur.

Ces phénomènes sont au fondement de l'éventuelle diminution de l'énergie sonore par l'environnement et en particulier par les éléments de biodiversité, dont la végétation fournit la part la plus importante et la plus structurante pour les paysages.

Cette partie envisagera donc les modalités selon lesquelles cette végétation peut contribuer à réduire la diffusion des sons et par conséquent la pollution sonore. Il faut cependant noter qu'elle ne concerne que les bruits terrestres. En ce qui concerne le bruit subaquatique, les principaux moyens de lutte connus contre la diffusion du bruit relèvent de l'artefact. Il s'agit en particulier de mettre en place des rideaux de bulles entre le lieu d'émission du bruit et le milieu à protéger (ce qui modifie la compressibilité de l'eau et donc la vitesse de propagation du son), ou encore d'installer des filets équipés de ballons remplis d'air. Dans le cas du battage de pieux, il est aussi possible d'entourer le pieu d'un tuyau en acier qui joue le rôle d'un bloc isolant et qui réduit le volume sonore de l'opération de battage.

Ces méthodes sont cependant coûteuses et parfois délicates à mettre en œuvre, et leur utilisation est loin d'être généralisée. En mer, une autre méthode visant à limiter l'impact du son sur la faune consiste à faire en sorte d'éloigner les espèces potentiellement susceptibles de subir cet impact. Dans certains cas, les opérateurs démarrent lentement les travaux afin de laisser le temps aux animaux sensibles de s'enfuir. Si nous mentionnons ces techniques rapidement ici, elles n'entrent cependant pas dans le cadre strict de cette étude, puisqu'elles ne font pas appel à la

biodiversité pour atténuer les effets de la pollution sonore. C'est pourquoi nous nous concentrerons dans les lignes qui suivent sur les effets de la biodiversité sur le bruit dans les milieux terrestres, et pour ainsi dire exclusivement aux impacts de la végétation aérienne sur la pollution sonore.

L'IMPACT SONORE DE LA VÉGÉTATION TERRESTRE

En milieu aérien et donc terrestre, la végétation possède trois particularités lui permettant de réduire les niveaux sonores, et qui correspondent aux moyens de réduction des ondes sonores déjà évoqués. Tout d'abord, elle réfléchit et diffuse (ou diffracte) le son grâce aux éléments végétaux qui la composent, tels que les branches, les feuilles et les troncs. Par ailleurs, elle convertit l'énergie sonore en chaleur grâce aux vibrations mécaniques des éléments qui entraînent une dissipation : il s'agit alors du phénomène d'absorption. Enfin, il peut exister une interférence destructive entre la contribution directe de la source au récepteur et la contribution reflétée par le sol. On parle alors de phénomènes dits d'« effet de sol acoustique ».

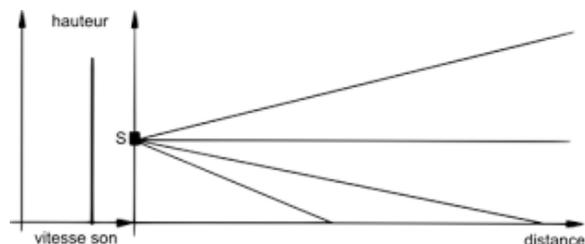
Il faut aussi compter avec les effets atmosphériques et micrométéorologiques liés notamment aux variations de la vitesse des vents, de la température et de l'humidité, qui dépendent en partie du couvert végétal. Le premier d'entre eux est l'absorption atmosphérique, qui dépend de la température (plus il fait chaud et plus l'absorption diminue) et du taux d'humidité de l'air (plus l'humidité augmente et plus l'absorption diminue). Elle affecte davantage les hautes fréquences* que les basses fréquences* acoustiques, et n'a en général un effet significatif que sur des distances de propagation importantes (ex : 1 dB/km à 200 Hz et plus de 40 dB/km à 5 kHz, pour T=20 °C et une humidité relative de 50 %).

La propagation du bruit est également dépendante des conditions météorologiques, les rayons sonores pouvant s'incurver vers le haut ou le bas en fonction de la direction du vent et du gradient de température. Par vent portant, il est ainsi possible d'entendre nettement le trafic routier d'une autoroute située à plusieurs centaines de mètres et de l'entendre beaucoup moins par vent contraire.

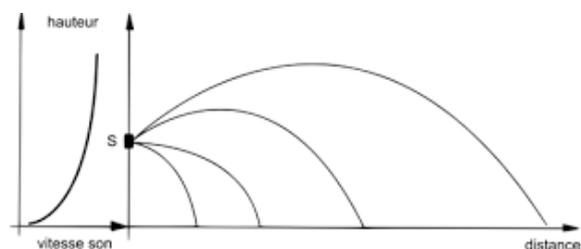
Lors d'inversions de température, les rayons sonores s'incurvent vers le bas, ce qui s'accompagne d'une augmentation du bruit perçu. Par exemple, à la suite du refroidissement nocturne, il est possible d'entendre un train à 5 km d'une voie ferrée sous le vent malgré les obstacles. Le son est alors contraint de se propager sous l'inversion par effet de guide d'onde.

L'hétérogénéité de l'atmosphère peut mener à trois conditions de propagation suivant le profil de vitesse du son résultant.

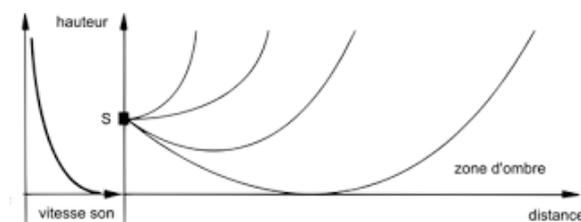
Dans des conditions de propagation homogènes, la vitesse du son est constante en fonction de l'altitude, et les ondes sonores se propagent en ligne droite.



Dans des conditions de propagation favorables, la vitesse du son augmente avec l'altitude, les ondes sonores sont rabattues vers le sol.



Dans des conditions de propagation défavorables, la vitesse du son diminue avec l'altitude, les ondes sonores sont déviées vers le ciel. C'est le cas lorsque la température décroît avec l'altitude.



Dans ces conditions, l'un des avantages de la couverture arborée d'une bande de terrain tient en particulier au fait qu'elle permet de maintenir une température plus élevée au sol, en particulier de nuit. Il en résulte donc une déviation vers le haut d'une partie des ondes acoustiques, ce qui peut réduire les niveaux sonores de 1 à 2 dB(A).

En forêt, la propagation du son est marquée par plusieurs phénomènes, à commencer par l'effet de sol, qui implique une importante atténuation des basses fréquences* grâce aux propriétés poreuses et donc absorbantes du sol. Ce phénomène est lié à l'interférence entre l'onde directe et l'onde réfléchie par le sol. Cet effet est prédominant jusqu'à environ 1000 Hz et est d'autant plus important que la source et le récepteur sont proches du sol et que la distance de propagation est grande. En ville, les surfaces végétalisées apportent ainsi un gain sonore de 2 à

4 dB(A) par rapport aux surfaces minérales réfléchissantes.

Au-dessus de 1000 Hz, l'effet de diffusion par les troncs d'arbres devient important et l'effet de sol diminue. Et au-delà de 2 à 4 kHz (selon les espèces), l'effet de diffusion et d'absorption du feuillage ou des épines s'ajoute à celui des troncs et du sol. L'absorption et la diffusion par les feuilles et/ou les épines sont donc deux phénomènes à prendre en compte pour le calcul de l'atténuation en hautes fréquences*, bien que la forêt soit globalement plus efficace pour freiner les fréquences* basses et moyennes. Ceci étant, cet effet pourra être négligé du fait de son faible impact sur le niveau global dans le cas de bruit routier ou ferroviaire. De plus, dans le cas d'un feuillage caduc, cet effet n'existe plus en hiver : il est d'autant plus justifié de le négliger dans la plupart des situations.

La forêt pourrait être aussi utilisée en tant qu'écran climatique permettant de limiter les effets négatifs des gradients de vent et de température. Selon les différentes situations météorologiques et dans le cas d'une émission de bruit routier, un gain acoustique de l'ordre de 5 dB(A) a été mis en évidence de nuit derrière une bande forestière d'une largeur de 100 m sur le bruit de trafic routier dans le cas d'une situation caractéristique de nuit. Ce gain est de l'ordre de 3 dB(A) dans le cas d'un vent portant.

Une expérience réalisée par N. Barrière et J. Defrance (2001) à proximité de la RN10, entre Bordeaux et Le Barp (Gironde), a permis d'estimer le gain apporté sur les niveaux sonores par la présence d'une bande forestière de 110 mètres d'épaisseur en bordure de route, par rapport à un site déboisé. Suivant les conditions météorologiques, ce gain est plus ou moins important. En conditions favorables, un gain de l'ordre de 3 dB (A) a été observé. En effet, grâce à la diminution des gradients de température à l'intérieur de la forêt, les conditions météorologiques sont homogénéisées créant une situation moins favorable à la propagation en forêt qu'en plaine. En conditions homogènes, l'efficacité de la forêt est légèrement plus faible (-2,5 dB(A)) qu'en conditions favorables. L'effet de la météorologie n'intervient pas dans ce cas, l'efficacité est donc essentiellement due à l'effet de diffusion des troncs d'arbre. En conditions défavorables, l'efficacité de la forêt mesurée est plus faible et égale à environ -1 dB(A).

Une autre expérience (P. Gulia et A. Gupta, 2016) a porté sur l'utilisation de thuyas disposés périodiquement pour diminuer la pollution sonore produite par les transports. Ici, les arbustes dont l'effet était testé étaient d'une hauteur de 2,40 m et étaient disposés en rangées de cinq, espacés de 1,50 m. Les résultats montrent une atténuation sonore significative dans les plages de fréquence* allant jusqu'à 500 Hz, ce qui indique que les arbres

peuvent être utilisés dans certaines conditions pour lutter contre la pollution sonore.

Ces trois premières expériences montrent qu'une épaisseur végétalisée suffisante permet de modérer les signaux acoustiques, et sont partiellement confirmées par une quatrième étude conduite par N. Nejadrezaei et R. G. Macajoux dans la commune de Mont-Saint-Aignan (Seine Maritime, France). Dans ce cadre, des mesures de bruit ont été effectuées dans un champ d'étude situé proche d'une autoroute, d'un centre commercial et d'un chantier, à chaque fois dans deux zones différentes, l'une se situant dans une aire de végétation et l'autre non. Durant le protocole, quinze mesures différentes ont été prises dans la zone d'étude, en mesurant à chaque fois le niveau sonore dans les zones végétalisées et non végétalisées, soit 30 mesures au total.

		Minimum	Maximum	Moyenne
Niveaux de bruits minimums	Végétation	43 dB	63 dB	51 dB
	Sans végétation	50 dB	70 dB	59 dB
Niveaux de bruits moyens	Végétation	54 dB	72 dB	62 dB
	Sans végétation	60 dB	83 dB	71 dB
Niveaux de bruits maximums	Végétation	68 dB	84 dB	76 dB
	Sans végétation	73 dB	88 dB	82 dB

Relevés des niveaux sonores lors de l'expérience conduite à Mont-Saint-Aignan

Selon cette étude, la végétation abaisse les niveaux sonores. Les chercheurs soulignent également qu'il apparaît préférable d'effectuer des plantations mixtes (arbres feuillus ou non), de combiner des reliefs et d'utiliser des plantes à feuilles persistantes.

Ces différents protocoles montrent donc que l'incidence de la végétation sur le bruit ambiant existe, mais aussi qu'il faut des épaisseurs assez considérables d'espaces végétalisés pour obtenir une réduction significative de l'énergie sonore : en pratique, l'impact de la végétation est de l'ordre de 1 à 5 dB(A), ce qui renforce l'effet d'éloignement de la source sonore, mais ce dernier effet reste prépondérant. Il est peu perceptible en comparaison par exemple avec l'installation de murs antibruit, qui apportent une amélioration de l'ordre de 8 à 12 dB(A), sans même oser une comparaison avec la mise en place de fenêtres isolantes pour préserver les espaces privés, qui apportent une amélioration de 30 dB(A) ou plus.

ÉLÉMENTS VÉGÉTALISÉS EN MILIEU URBAIN DENSE

En ville et en particulier dans les grandes agglomérations, on observe depuis les années 1990 environ une tendance à enrichir le tissu végétal par divers moyens complémentaires. Les murs et toitures végétalisées se développent de la sorte pour apporter des points de végétation au-delà des jardins et parcs, des arbres d'alignement et des points de fleurissement, et l'on assiste aussi depuis les années 2010 à une certaine vogue de la végétalisation en pieds d'immeubles, voire dans certains cas à une désartificialisation et à une végétalisation d'une partie des voiries.

Outre leurs avantages visuels, certains de ces aménagements peuvent dans des conditions adéquates apporter des avantages acoustiques.

Les toitures végétalisées sont de plus en plus courantes dans les grandes agglomérations, en particulier sur les immeubles neufs, mais pas uniquement. Elles permettent de créer des jardins sur les toits dans les lieux urbains où l'espace végétalisable au sol est rare.

Parmi ces toitures, on distingue les toits végétaux intensifs des toits extensifs. Les toits de type intensif comportent un sol épais permettant de mettre en place une flore variée qui peut comprendre des buissons et des arbres. Les toits de type extensif présentent quant à eux un sol peu épais et rudimentaire dans lequel seule une flore composée de plantes grasses de petite taille est installée ou s'installe spontanément (sedums, notamment).

Hormis leur fonction d'îlots de biodiversité et leur fonction esthétique visuelle, les toits végétaux possèdent également une fonction d'isolation acoustique, en particulier lorsqu'ils sont intensifs. Leurs propriétés physiques permettent en effet de réduire la transmission du son extérieur vers l'intérieur des bâtiments. Cette réduction dépend principalement de l'épaisseur du milieu de culture.

Sauf exception, les couches qui permettent l'installation d'une toiture végétalisée sont sensiblement les mêmes (de bas en haut) :

- Une couche d'isolation.
- Une membrane étanche à l'eau.
- Une barrière anti-racines, qui empêche les racines des plantes de transpercer la membrane étanche et qui favorise l'aération du milieu.
- Une couche de drainage.
- Un géotextile ou tapis filtrant qui permet à l'eau de s'infiltrer en empêchant l'érosion des particules fines du sol.
- Un milieu de culture.
- La végétation elle-même.

Les toits extensifs et intensifs ne présentent toutefois pas les mêmes caractéristiques (voir tableau page suivante).

Toit intensif	Toit extensif
Sol épais (minimum 30 cm) Terre non compactée	Sol fin (de l'ordre de quelques cm) Substrat granulaire
Jardins plutôt traditionnels avec arbres, buissons, reliefs, décorations	Structure plate accueillant des plantes grasses Peut être posé sur des pentes supérieures à 30°
Requiert beaucoup de maintenance	Requiert peu de maintenance
Charge importante	Charge légère

Comparaison entre les toits végétalisés intensifs et extensifs

De façon générale, les toits verts apportent une isolation sonore, en particulier s'ils sont intensifs : ils réduisent alors la transmission du son dans le bâtiment jusqu'à 40 dB, la réduction du bruit dépendant principalement de l'épaisseur du milieu de culture.

Mais dans les rues en « U », les toitures végétalisées apportent aussi un petit gain acoustique externe de l'ordre de 1 dB(A) environ, les gains pouvant être plus notables dans les cours intérieures des îlots de bâtiments : c'est ce que montre notamment une étude menée par T. Van Renterghem et al. (2012). En 2017, T. Van Renterghem a également publié un autre article qui établit que les toits végétaux peuvent réduire le niveau sonore à proximité ou à l'intérieur des immeubles concernés : la diminution induite du bruit routier peut dans certains cas se situer entre 2,3 et 5,5 dB(A).

Une expérience a été menée par H. Yang et al. (2010) dans une chambre semi-anéchoïque* pour tester l'effet acoustique d'un toit végétal constitué de 20 plateaux garnis de substrat Zinco* d'une profondeur de 10 cm, disposé sur une boîte située à 1,20 m du sol. Chaque plateau pesait 24 kg et était végétalisé avec neuf espèces indigènes typiques des milieux calcaires. Deux microphones ont été positionnés à 1,6 m et à 1 m de hauteur d'un côté de la caisse tandis que la source de bruit provenait de l'autre. À titre de référence, des premiers tests ont été effectués avec les plateaux vides.

Deux types de couvertures ont été testés sur ces plateaux :

- Couverture de ouate 100 % polyester au-dessus de la végétation, ce qui simulait des conditions extrêmes d'absorption acoustique par la végétation.
- Couverture par des feuilles fraîches taillées, ce qui simulait une densité maximale des feuilles.

Selon les résultats obtenus, l'effet de la réduction du bruit augmente progressivement avec la surface croissante du toit. Les rangées successives apportent des atténuations meilleures sur différentes

fréquences*. La première rangée apporte un plus fort effet sur les bruits à haute fréquence*, la deuxième un effet plus fort sur les moyennes fréquences* et la cinquième rangée un plus fort effet sur les bruits à basse fréquence*. Les plateaux recouverts de ouate ont par ailleurs montré les meilleurs résultats.

En ville, les murs végétaux constituent un autre artefact susceptible d'apporter de la biodiversité au milieu. Comme les toits, ces murs peuvent être extensifs (culture de plantes grimpantes) ou intensifs (systèmes de cultures de plantes dans des caissons remplis de substrats de culture, le plus souvent irrigués).

Selon leurs configurations, les murs végétaux intensifs peuvent apporter une isolation phonique dont bénéficient les occupants des immeubles : cette isolation est essentiellement apportée par le substrat de culture. Il apparaît aussi que dans certaines configurations, notamment dans le cas de rues en « U » et dans celui des cours ou places urbaines, les murs végétalisés peuvent apporter un gain sonore de l'ordre de 2 à 4 dB(A) résultant de la diminution des réflexions des sons du fait des matériaux absorbants utilisés pour constituer le substrat des plantes (pouzzolane, fibre de coco, laine à base de fibres de chanvre, etc.).

Au-delà de ces deux grands types d'éléments propres aux immeubles, le projet européen HOSANNA (*HOListic and Sustainable Abatement of Noise by optimized combinations of Natural and Artificial means*) a regroupé treize partenaires techniques et universitaires à l'échelle internationale pour envisager l'utilisation de moyens combinés de réduction du bruit en ville, faisant très souvent appel à des dispositifs végétalisés. Les parties prenantes de ce projet soulèvent le fait que le recours à la végétalisation des immeubles n'est qu'un des moyens pour réduire les signaux sonores en ville, et proposent d'associer plusieurs dispositifs pour réduire le bruit à la fois à la source et au niveau de sa diffusion.

À la source, il s'agit premièrement de disposer des obstacles à la propagation des ondes sonores émises par les automobiles et les moyens de transport ferré (tramway). Le projet HOSANNA propose de mettre en place des barrières sonores associant différents types de matériaux naturels et recyclés au plus près des voiries : un des principes proposés consiste de la sorte à aménager une surface verticale face à celles-ci et à proposer des aménagements en pente plus ou moins relevée du côté extérieur, qui peuvent dans la plupart des cas être végétalisés. Le gain sonore lié à ce type de dispositifs est de l'ordre de 7 à 10 dB et est donc significatif.

Le projet HOSANNA préconise aussi plusieurs types d'aménagement de surface à proximité des sources,

en particulier sur la voirie elle-même. Il est ainsi de plus en plus courant que les voies des tramways soient plantées de gazon ou de surfaces d'herbe qui ont la propriété d'absorber une partie du son produit, l'effet étant en fait obtenu essentiellement du fait de l'épaisseur de terre présente. Ces surfaces peuvent aussi être disposées à proximité des voiries. Du reste, il serait même envisageable de créer des voies à faible vitesse destinées aux voitures en y plaçant une bande enherbée entre deux pistes de roulement asphaltées : des gains d'au moins 5 dB sont à attendre de ce type d'aménagements.

En parallèle, les porteurs du projet soulignent l'intérêt des arbres, notamment pour lutter contre la réverbération dans les rues en U ou les espaces fermés (cours). Leur feuillage, en particulier, dissipe une partie de l'énergie sonore vers le haut et limite ainsi les phénomènes de résonance.

De façon générale, le projet HOSANNA – qui étudie aussi un certain nombre de solutions ne faisant pas appel à la végétation – considère qu'il convient d'associer les différentes techniques de maîtrise de la pollution sonore en ville pour obtenir la plus grande efficacité, notant en particulier que les murs et toitures végétalisées ne suffisent généralement pas à garantir à eux seuls un abattement significatif. En ville, l'approche de maîtrise du bruit se doit ainsi d'être globale, associant moyens de réduction à la source, éléments permettant de réduire la diffusion et moyens d'isolation des immeubles.

MERLONS VÉGÉTALISÉS

Dans les zones de moindre urbanisation que le cœur des centres-villes, les merlons de terre font partie des dispositifs utilisés pour maîtriser les nuisances sonores. Les merlons sont des buttes de terre d'une hauteur de l'ordre de deux à cinq mètres (voire plus) qui sont mis en place lors de l'installation d'infrastructures de transport ou après cette installation dans l'objectif de réduire l'impact visuel et sonore de la circulation qui emprunte ces linéaires. Dans les zones habitées en particulier, les merlons présentent toute une série d'avantages. Ils réduisent grandement la réflexion du bruit vers les zones bâties, proposent une surface de sol relativement absorbante et peuvent être végétalisés, ce qui améliore encore leurs performances.

Selon la thèse de F. Koussa (2013), les merlons de terre peuvent avoir une efficacité acoustique comparable voire supérieure à celle d'un mur droit antibruit (qui est de l'ordre de - 10 dB(A)) s'ils présentent des profils géométriques complexes. À noter toutefois qu'à performance acoustique égale, les merlons doivent être disposés à une plus grande distance de la voirie émettrice du fait de leur forme

arrondie, qui implique une plus grande distance entre la voirie bruyante et leur arête. Ils nécessitent de ce fait une plus grande emprise paysagère (la surface du merlon représente environ trois à quatre fois sa hauteur) et ne peuvent donc pas être installés partout en fonction des contraintes que présentent les sites.

Les merlons sont intéressants du point de vue de la biodiversité à plusieurs titres. Tout d'abord, leur aménagement n'exige généralement pas d'apport de matériaux artificiels, voire extérieurs aux sites à équiper. À leurs avantages acoustiques s'ajoute un intéressant apport en termes de biodiversité ordinaire, puisque leur gestion peut être extensive et parce que la présence d'une pente procure des habitats légèrement différenciés propres à accueillir des espèces assez variées.

Autre avantage pour la biodiversité : les merlons mis en place dans les zones les plus habitées prolongent les bordures vertes de voiries – en particulier celles des routes, des autoroutes et des voies ferrées. Ils renforcent ainsi la continuité écologique avec les bordures non cultivées de ces voiries, qui participent dans un certain nombre de cas aux corridors écologiques qui relient les zones urbanisées aux zones plus rurales. À condition d'une certaine cohérence dans les tracés des bordures, la lutte contre le bruit en ville au moyen des merlons est donc favorable à une bonne circulation des espèces animales et végétales entre les espaces urbains et les autres espaces, ce qui peut dans un certain nombre de cas participer au renforcement des trames vertes et bleues*.

SYNTHÈSE SUR L'EFFET DE LA VÉGÉTATION

La revue effectuée ci-dessus montre que le rôle joué par la végétation pour limiter la propagation des sons (y compris anthropiques) existe, en particulier pour limiter la diffusion des basses fréquences* (G. Preeti et G. Arpan, 2016), mais aussi que cet effet rencontre certaines limites. En rase campagne, hormis dans le cas de certains merlons végétalisés, l'effet de réduction induit n'est de l'ordre que de quelques dB(A), l'intensité des sons aériens étant réduit essentiellement en raison de la distance à la source sonore et de l'influence de la météorologie : là où l'air circule, le son circule, et N. Barrière et J. Defrance (2001) ont bien montré à quel point la météorologie, et en particulier l'intensité et le sens des vents, joue un rôle prépondérant sur la propagation des sons.

Dans ces conditions, il faut noter que l'effet de la végétation sur la réduction des signaux qui peuvent affecter la biodiversité des espaces ruraux – et en particulier les animaux de toutes sortes – est assez

minime pour les espèces terrestres⁴.

En ville, l'effet d'atténuation sonore apporté par les murs et les façades végétalisés, mais aussi les parterres végétaux et les arbres, peut cependant jouer un certain rôle pour les habitants des immeubles et des quartiers concernés. Cet effet provient pour l'essentiel des substrats de culture et des couches isolantes insérées dans les systèmes mis en place, et non de la végétation elle-même.

Il en résulte dans certains cas une contribution à l'amélioration du confort sonore pour les habitants : en ville, en complément des réductions de la vitesse de circulation des véhicules et de l'installation de revêtements acoustiques, les dispositifs végétalisés font ainsi partie des rares moyens de tempérer les nuisances sonores ambiantes et présentent ainsi un intérêt réel, ce d'autant plus que cet avantage s'ajoute à d'autres aménités. Nous verrons ci-dessous que la composante psychologique est d'ailleurs à prendre également en compte dans les milieux urbanisés.

L'EFFET PSYCHOLOGIQUE CHEZ L'ÊTRE HUMAIN

Sauf exception, nous avons constaté que la végétation n'a pas d'effet notable sur la propagation du bruit dans les milieux aériens. L'homme est cependant culturellement sensible aux ambiances sonores et les populations accueillent généralement positivement les sons liés à la nature. Les chants des oiseaux sont liés pour une grande majorité de personnes à l'idée de bonheur ou du moins de confort sonore et participent ainsi à l'attrait des villes et, plus encore, des campagnes et des espaces naturels. À la dimension visuelle des paysages s'ajoute ainsi celle du son, aspect que s'efforcent de saisir les spécialistes des paysages sonores.

Dans un contexte d'urbanisation croissante – plus de la moitié des êtres humains vivent désormais en ville –, la ville est de plus en plus appréhendée comme le milieu de vie le plus courant et l'influence des modèles urbains se fait ressentir même dans les zones peu denses. Si nous avons vu que les espaces naturels et les campagnes ne sont pas épargnés par le bruit anthropique, il n'en reste pas moins que l'espace urbain reste en moyenne plus bruyant que les autres du fait de la concentration de population et d'activités, mais aussi notamment en raison de la concentration de réseaux de transports, au premier rang desquels figure la route.

Dans ce contexte, l'urbanisme contemporain est

marqué par une demande de nature en ville. La plupart des contemporains aspirent à une présence de la biodiversité dans les espaces urbains et cette présence est l'une des variables clés du concept émergent de ville durable. Cette biodiversité est spontanément présente en ville : les mousses et les lichens et un certain nombre de plantes investissent rapidement les espaces minéraux et les espèces animales les plus généralistes fréquentent les tissus urbains, qu'il s'agisse d'insectes, d'oiseaux ou de mammifères.

Pour autant, l'attrait des quartiers dépend beaucoup de la conception et de la présence d'espaces publics et privés de nature au cœur du tissu urbain. C'est particulièrement le cas pour les espaces végétalisés et les infrastructures vertes que sont les squares, les parcs, les jardins, les espaces interstitiels et les arbres d'alignement, qui sont essentiels à l'appropriation de l'espace public par la population urbaine.

Ces éléments de nature et de biodiversité en ville sont le plus souvent appréhendés sous l'angle du confort visuel et des aménités liées à la modification de la lumière, de l'humidité et plus généralement de l'ambiance sensorielle apportée par la faune, la flore, l'eau, le soleil, le vent, etc. ; mais rares sont les recherches qui s'intéressent à leur impact sur la perception de l'ambiance sonore.

Pourtant, nous avons vu que la perception du son et son éventuelle qualification en bruit dépendent en partie de la réaction du récepteur des signaux sonores. C'est particulièrement le cas pour l'espèce humaine, dont les perceptions sont hautement influencées par les variables culturelles ou contextuelles.

Une étude sur la perception du bruit dans des lieux végétalisés

Le ressenti des individus qui fréquentent les espaces végétalisés en ville est le résultat d'une expérience qui associe tous les sens, médiatisé par des représentations culturelles. Il en résulte une atténuation de la perception des bruits, comme le montre une expérience publiée en 2011 par S. Marry et M. Delabarre, portant sur l'impact de la végétation sur la perception de l'environnement sonore.

Dans le cadre de cette étude, les deux chercheuses se sont appuyées sur les réponses à 174 questionnaires, ont utilisé 513 photographies, et ont organisé 18 *focus groups in situ* ; 29 entretiens individuels ont aussi été menés hors contexte et 145 cartes mentales sonores ont été reconstituées. Les 29 personnes interrogées se sont rendues dans trois places végétalisées du département de l'Isère : la place

biodiversité et n'entrent donc pas dans le champ de la présente étude.

⁴ Pour rappel, les solutions envisagées en mer pour réduire la propagation des signaux sonores ne font pas appel à la

Mistral-Eaux-Clares et la place des Tilleuls de Grenoble, ainsi que la place Centrale du campus de Saint-Martin-d'Hères, dont les morphologies sont assez dissemblables.

Les questionnaires individuels ont été remplis sur chaque terrain et à deux saisons différentes, en septembre et en décembre, et il a aussi été demandé de photographier les trois éléments qui semblaient les plus caractéristiques de l'ambiance sonore de chaque lieu. Par la suite ont été organisés des entretiens collectifs et individuels, ainsi que le recueil des cartes mentales sonores personnelles (représentations abstraites du paysage sonore idéal et du pire paysage sonore possible).

Les résultats recueillis montrent que la référence à l'eau arrive en premier lieu en tant qu'élément de naturalité urbaine. Mais les participants jugent aussi l'environnement plus bruyant en hiver, lorsque les feuilles des arbres caduques sont tombées. À la question « Qu'entendez-vous ? », l'occurrence des sons naturels est moins fréquente que celle des sons liés aux transports, le bruit du tramway étant cité dans plus de la moitié des questionnaires.

Pour autant, la végétation est le premier élément cité en réponse à la question posée sur les éléments visuels perçus. Les trois éléments les plus photographiés dans le but de traduire l'ambiance des espaces visités sont en premier lieu les matériaux, puis le bâti et enfin la végétation. Et les sons naturels apparaissent comme les éléments les plus présents dans les cartes mentales faisant référence à l'ambiance sonore idéale d'une place ; concomitamment, l'absence de végétation est la plus récurrente dans les cartes mentales caractérisant la pire ambiance sonore d'un espace.

De façon globale, il ressort de ces résultats que les personnes enquêtées font largement référence à la végétation lorsqu'il s'agit de caractériser l'ambiance sonore des lieux et qu'il existe une corrélation forte entre la présence du végétal et la perception de cette ambiance. Certains entretiens montrent même que des individus expriment même l'idée qu'objectivement, le son n'est pas réellement modifié, mais que la présence de la végétation modifie pour autant cette perception.

À la suite d'autres travaux comparables, l'étude de S. Marry et M. Delabarre confirme donc l'influence de l'ambiance végétale sur le vécu des paysages sonores. Du reste, les réponses à la question posée sur la carte mentale sonore idéale font ressortir que les sons liés à la nature (faune) arrivent au premier rang pour l'évaluation positive d'un paysage sonore,

juste devant les sons humains et les sons liés à la végétation et à l'eau. À l'inverse, l'absence de végétation est jugée comme le premier facteur d'une ambiance sonore désagréable, devant les bruits de circulation, les klaxons et les vélomoteurs.

Il en ressort notamment que du point de vue de la perception sonore, les dispositifs antibruit (merlons de terre, murs antibruit) gagnent à être végétalisés non pas prioritairement en raison de l'efficacité physique des plantes, mais des avantages conférés au confort perceptif des personnes exposées au bruit.

Les jardins sonores

En dernier lieu, on relève des tentatives de paysagistes et d'urbanistes visant à modifier l'ambiance sonore perçue dans les espaces verts et jardins. Outre l'utilisation de merlons de terre en tant qu'isolants visuels et acoustiques, qui est une forme d'aménagement assez courante, les concepteurs de certains jardins s'efforcent de camoufler les bruits ressentis comme désagréables par des bruits perçus comme agréables : on évoque alors la notion de jardins sonores.

Ainsi, les aménageurs du parc des Alisiers d'Antony (Hauts-de-Seine) ont introduit dans cet espace vert des insectes en grande quantité afin d'attirer la perception des usagers vers les chants produits par ces insectes plutôt que vers un certain nombre de bruits présents dans l'environnement immédiat et jugés dérangeants.

À Villejuif (Val-de-Marne), un « Jardin du silence » a été mis en place dans le parc départemental des Hautes Bruyères, qui est classé en tant qu'Espace naturel sensible au nom de la biodiversité qu'il héberge. Ce parc proposant de nombreuses activités a remplacé une ancienne carrière et comporte un cratère d'une quinzaine de mètres de profondeur, qui a été conservé et végétalisé pour proposer aux visiteurs une zone de calme à proximité de l'autoroute A6, le Jardin du silence. Dans la journée, les niveaux sonores qui y sont relevés sont inférieurs à 50 dB(A), ce qui renforce son caractère d'espace de détente dans un contexte urbain dense. Ce dispositif complète le fait qu'un merlon de terre a été modelé en bordure est de l'autoroute : il permet de réduire de 22 dB(A) le bruit du trafic, qui est de l'ordre de 280 000 véhicules par jour.

De façon générale, les circulations d'eau et autres fontaines sont très utilisées dans les parcs et jardins, mais aussi sur les places et les ronds-points afin d'apporter un son perçu comme agréable et apaisant, ce qui tempère la pollution sonore.

PARTIE 3

ASPECTS RÉGLEMENTAIRES

INTRODUCTION

En France et en Europe, la réglementation relative au bruit est avant tout tournée vers la protection de l'environnement sonore anthropique. À travers la directive 2002/49/CE, l'approche européenne cible ainsi « le bruit dans l'environnement auquel sont exposés en particulier les êtres humains dans les espaces bâtis, les parcs publics ou d'autres lieux calmes d'une agglomération, les zones calmes en rase campagne, à proximité des écoles, aux abords des hôpitaux ainsi que d'autres bâtiments et zones sensibles au bruit. »

En France, le Code de l'environnement insiste lui aussi sur les bruits de nature à présenter des dangers, à causer un trouble excessif, à nuire à la santé humaine ou à porter atteinte à l'environnement. Cette dernière notion ouvre potentiellement à une attention aux effets du bruit sur la biodiversité, mais le contexte et la pratique orientent quasi exclusivement la notion sur l'environnement compris comme centré sur l'être humain, et de façon plus générale, le concept même d'environnement est lui-même anthropocentré : en témoignent notamment des dépôts de plaintes orientés contre les sons produits par les animaux de ferme en milieu rural.

Deux textes essentiels portent les ambitions du législateur français en matière de protection contre le bruit : la loi du 31 décembre 1992 relative à la lutte contre le bruit, et la loi d'orientation des mobilités du 24 décembre 2019 : cette dernière introduit les notions juridiques de pollution sonore et de droit à un environnement sonore préservé, mais ne s'intéresse pas spécifiquement aux effets du bruit sur la biodiversité.

Ceci étant, certains dispositifs réglementaires mettent en place des zones spécifiques de protection dans les espaces naturels. C'est le cas indirectement pour la notion de zones calmes prévues par les Plans de prévention du bruit dans l'environnement, qui sont une des conséquences de la déclinaison de la directive 2002/49/CE en France : cette notion ne concerne pas uniquement les agglomérations retenues comme autorités compétentes, mais aussi les abords des infrastructures routières, autoroutières et ferroviaires, et par conséquent un certain nombre de milieux naturels. Ces zones sont définies par la réglementation comme des espaces extérieurs remarquables du fait de leur faible exposition au bruit, et dans lesquels l'autorité compétente souhaite maîtriser l'évolution de cette exposition au regard des activités humaines pratiquées ou prévues.

En parallèle, des dispositions relatives au bruit sont explicitement prévues dans les réglementations relatives aux réserves naturelles et aux parcs naturels

nationaux, dans lesquels l'exécution de travaux peut être encadrée, tout comme, dans certains cas, la circulation des personnes ou des véhicules.

En ce qui concerne spécifiquement les milieux marins, une réglementation dédiée se met progressivement en place. La directive-cadre 2008/56/CE les considère comme un patrimoine précieux à protéger et à conserver afin en particulier de maintenir la biodiversité marine. L'Organisation maritime internationale (OMI) a reconnu la nécessité d'agir pour réduire la pollution sonore causée par les navires. En 2014, elle a adopté des directives pour la réduction du bruit sous-marin ainsi que des mesures sur l'efficacité des carburants applicables à toutes ses flottes (MEPC.1/Circ.883). Ces directives peuvent s'appliquer à tout navire commercial et donnent des conseils généraux sur la réduction du bruit sous-marin aux concepteurs, aux constructeurs et aux exploitants de navires.

La France a admis que le bruit sous-marin constitue une pollution depuis 2010 : la loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement (Chapitre V – Article 166) a inscrit cette reconnaissance au sein du code de l'environnement, au chapitre 9 – Section 2 « Protection et préservation du milieu marin ». La pollution du milieu marin y est définie comme l'introduction à la faveur d'activités humaines de déchets, substances, d'énergie, de lumière ou de bruit en mer. L'objectif est de prévenir et de maîtriser les impacts négatifs pour les ressources vivantes et les écosystèmes* : réduction de la biodiversité, risques pour la santé humaine, obstacles aux activités marines et côtières.

La loi française établit des Plans d'action pour le milieu marin (PAMM) déclinés pour la Manche-mer du Nord, les mers celtiques, le Golfe de Gascogne et la Méditerranée occidentale. Ces plans contiennent notamment un document de définition du bon état écologique, qui tient explicitement compte de la nécessité de ne pas introduire des sources sonores sous-marines susceptibles de nuire au milieu marin. Les critères retenus consistent à ne pas altérer les capacités de détection et de communication acoustique des grands cétacés*, à préserver la capacité des espèces sensibles à fréquenter des zones fonctionnelles et à faire en sorte que la mortalité occasionnée par les perturbations sonores anthropiques demeure marginale. Ces dispositions doivent être respectées par les projets de travaux ou d'aménagement qui font l'objet d'une étude d'impact, qui doivent être compatibles avec les objectifs du PAMM concerné. Néanmoins, aucune réglementation contraignante n'existe actuellement pour fixer des seuils de bruit à ne pas dépasser, pour appliquer les directives de l'OMI, ou encore pour réduire la vitesse des bateaux.

L'ÉTUDE D'IMPACT

Que ce soit sur terre ou en mer, l'étude d'impact est précisément l'une des modalités principales de la prise en compte des incidences du bruit anthropique sur les espèces et les écosystèmes*. L'article R. 122-2 du Code de l'environnement français définit l'ensemble des projets dont l'importance justifie l'obligation de la réalisation de ce type d'études préalables. L'étude d'impact doit comporter un constat précis de l'état initial du milieu et des effets négatifs et positifs des projets, qu'ils soient à court, moyen ou long terme.

L'analyse que constitue l'étude d'impact doit porter sur la faune et la flore, les habitats naturels, les équilibres écologiques, le bruit, les continuités écologiques, les interrelations entre milieux et l'analyse cumulée de plusieurs projets. En fonction des impacts prévus, des mesures adaptées doivent être prévues en vertu de la logique « Éviter, réduire, compenser » (ERC) révisée par la loi sur la biodiversité du 21 juillet 2016. Selon cette séquence, la priorité est accordée à l'évitement préventif des impacts négatifs, puis à leur réduction et à leur éventuelle compensation dans les cas où ces deux premiers volets se révèlent insuffisants.

Dans le contexte de l'étude d'impact, l'effet du bruit anthropique sur les milieux et les espèces est donc en principe pris en compte, étudié, et les mesures ERC doivent agir notamment sur cette source de pollution, qu'elle soit strictement liée à la phase travaux et/ou au fonctionnement de l'infrastructure ou de l'activité qui font l'objet du projet. La jurisprudence confirme ce principe : ainsi, la Cour d'appel de Douai a considéré le 13 juin 2013 que les mesures prévues par l'étude d'impact relative à un nouveau plan d'urbanisme et visant à éviter, réduire et compenser les incidences liées à la lumière et au bruit étaient suffisantes.

En mer, l'étude d'impact concerne principalement les projets énergétiques et d'exploitation des ressources marines ou du fond des océans en raison de leurs conséquences potentielles sur la biodiversité et les milieux, mais elle doit aussi prendre en compte les effets sur la pêche professionnelle et donc les impacts sur la ressource halieutique. Cela oriente en principe les études en particulier sur les impacts possibles sur les poissons, les céphalopodes*, des crustacés, etc., tout au long de leurs cycles de vie.

Dans tous les cas, les projets soumis à étude d'impact ne se voient attribuer leur autorisation par l'autorité compétente qu'après étude des données de l'étude, de l'avis de l'autorité publique compétente et des résultats de la consultation publique obligatoirement mise en œuvre.

LE RÉSEAU NATURA 2000 ET LES ESPÈCES PROTÉGÉES

Les zones Natura 2000 sont définies dans les États membres de l'Union européenne en vertu de l'application de la directive Habitat, qui se situe au cœur de l'action européenne pour la conservation de la nature.

Ce texte applique les directives précédentes Habitats et Oiseaux, qui dressent la liste des habitats et des espèces dont la présence justifie la mise en place de sites Natura 2000. Ils font l'objet d'une gestion adaptée aux objectifs de conservation. En France, plus de 500 taxons* végétaux terrestres et plus de 500 espèces d'oiseaux sont concernés par l'application de cette directive, ce qui offre des possibilités assez larges d'actions de conservation. Le nombre d'espèces marines visées est bien moindre : les mammifères marins et les tortues marines sont bien concernés, mais ce n'est le cas d'aucun poisson. Seuls six invertébrés* marins et deux espèces végétales marines, ainsi que leurs habitats, sont protégés au niveau national en France au titre du réseau Natura 2000.

Dans les zones de conservation concernées, l'article 6 de la directive Habitat prévoit que les États en question prennent les mesures appropriées pour éviter la détérioration des habitats naturels, tout comme la perturbation affectant les espèces au nom desquelles ces zones ont été instituées. Ce principe s'étend aux plans ou projets non liés directement à la gestion des sites mais susceptibles de les affecter de façon significative : tous doivent faire l'objet d'une évaluation appropriée au regard des objectifs de conservation énoncés par la directive Habitat.

Les incidences dont les sites concernés peuvent faire l'objet comprennent donc potentiellement les effets du bruit, mais la transposition française de la directive Habitat par le Code de l'environnement et par les listes locales départementales n'en précise pas explicitement la nature. En pratique, l'évaluation conduite en cas de projet concernant des sites classés Natura 2000 est donc la plus large possible et peut prendre en considération les effets du bruit anthropique, ce d'autant plus que la Commission européenne précise à travers un guide d'application de la directive que les perturbations à prendre en compte concernant les espèces visées par la mise en conservation des sites désignés comprennent le bruit et la lumière. Sont pris en compte les impacts négatifs sur les habitats protégés, même si le bruit ou la lumière ne portent pas directement atteinte à l'intégrité physique des espèces visées.

En France, une circulaire à l'intention des préfets de régions et de départements, ainsi que des préfets maritimes, reprend expressément cette méthodologie et mentionne explicitement le bruit parmi les éléments potentiellement perturbateurs. Ces éléments ont été repris par un certain nombre de documents d'objectifs chargés dans les départements de la mise en œuvre de la directive Habitats et ont été confirmés par la justice européenne en 2011.

À noter en outre que la présence d'espèces protégées en dehors de tout site Natura 2000 donne lieu à une réglementation qui évoque les dispositifs de réduction des nuisances sonores en cas de projets pouvant affecter leurs habitats. Le ministère de l'Écologie tient alors compte, en cas de demande de dérogation, des mesures pouvant réduire les impacts des nuisances sonores sur les espèces visées.

CONCLUSION

Au fil de l'avancement de la recherche scientifique, la crise écologique durable que traverse notre planète est de mieux en mieux connue. Cette véritable transformation du système Terre est d'ailleurs sans doute plus qu'une crise, comme le souligne l'hypothèse Anthropocène : selon cette hypothèse de plus en plus solide, les sociétés humaines seraient ainsi devenues désormais la principale force à l'origine de l'évolution de la biosphère*.

Cette situation préoccupe et inquiète de plus en plus nos contemporains, y compris en France. Selon une enquête d'opinion réalisée par Ipsos-Sopra Steria pour le journal *Le Monde*, la Fondation Jean-Jaurès et l'Institut Montaigne, et rendue publique en septembre 2019, les Français sont 52 % à placer en tête de leurs préoccupations la protection de l'environnement, devant l'avenir du système social et le pouvoir d'achat.

Face à cette préoccupation, les initiatives citoyennes, privées et publiques se multiplient de plus en plus, qu'il s'agisse de défense des milieux naturels, d'alimentation durable ou encore de développement des énergies renouvelables, entre autres. Dans les pays industrialisés comme ailleurs, les citoyens sont donc très inquiets de la situation actuelle et de l'avenir de notre planète, et ils le font savoir.

L'opinion publique est donc alertée et vigilante, mais elle reste peu informée des effets du bruit sur la biodiversité. Nous avons vu en introduction de ce rapport que la crise de la biodiversité fait partie des éléments les plus importants de la crise écologique globale. Ses causes les mieux répertoriées sont la disparition et la fragmentation des habitats naturels, ainsi que les pollutions d'origine chimique, pesticides en tête.

Au fil de ce rapport d'étude, il apparaît pourtant que le rôle joué par la pollution sonore sur la biodiversité est avéré et sans doute notable. L'érosion de la biodiversité est bien entendu multifactorielle et il est difficile d'isoler la contribution de la pollution sonore des autres pressions anthropiques qui fragilisent les écosystèmes (par exemple, pour les cétacés, les facteurs en cause sont le réchauffement climatique, les pêches, la pollution chimique (plastique), le trafic maritime (risque de collision), la pollution sonore, les activités côtières...). Force est toutefois de constater que les travaux de synthèse en matière d'impact de la pollution sonore restent encore très rares, qu'il s'agisse des niveaux nationaux comme du niveau international : à ce jour, aucune synthèse scientifique d'ampleur n'a été établie au niveau mondial pour caractériser les effets du bruit sur la biodiversité, tous

taxons* et écosystèmes* confondus.

Du point de vue de la recherche, le niveau de connaissance diffère beaucoup selon les taxons*. Au fil de l'accumulation des études conduites depuis le XXe siècle, le savoir scientifique sur les effets du bruit sur les animaux apparaît comme déjà robuste et important en ce qui concerne notamment les mammifères marins et les oiseaux, qui ont déjà fait l'objet de nombreux travaux, et à un moindre degré pour les poissons, voire pour les amphibiens*.

La situation de la recherche est cependant bien moins avancée pour les relations aux sons et les effets du bruit d'origine anthropique chez les mammifères terrestres, les reptiles et les arthropodes*. Elle reste souvent parcellaire pour ces derniers taxons, et elle est pour ainsi dire balbutiante en ce qui concerne les invertébrés* et les plantes. À notre connaissance, aucun travail de recherche n'a en particulier été mené sur les relations au bruit des végétaux aquatiques, qu'ils soient monocellulaires ou pluricellulaires, bien qu'ils soient à l'origine de près de la moitié de la production de biomasse* sur Terre.

Bruitparif ne saurait donc qu'encourager les organismes de la recherche biologique et écologique à poursuivre leurs travaux pour améliorer les connaissances scientifiques sur les relations des espèces vivantes au son en général et sur l'influence des bruits anthropiques en particulier, notamment chez les taxons* pour lesquels ce type d'études demeurent rares ou inexistantes. Les résultats acquis en la matière laissent entendre que de très nombreuses espèces sont plongées dans le monde sonore : ces perspectives de recherche pourraient donc fort bien être à l'origine de nouvelles révélations.

De la même façon, Bruitparif se permet d'en appeler à l'attention des organismes compétents en matière de biodiversité en ce qui concerne la thématique abordée dans ce rapport. Il apparaîtrait notamment souhaitable que l'IPBES puisse conduire des travaux de revue de la recherche à un niveau international, ce qui pourrait déboucher sur une réévaluation de l'impact du bruit sur la biodiversité au niveau mondial : nous avons en effet constaté ici que les rapports de synthèse de l'IPBES omettent pour le moment cette cause d'atteinte à la biodiversité.

Dans le même état d'esprit, Bruitparif appelle de ses vœux une plus grande attention des organismes spécialisés dans l'étude et l'évaluation du bruit, à la recherche et aux actions en ce qui concerne les relations entre le bruit et la biodiversité. Cette attention pourrait s'appliquer aux programmes

pédagogiques et de sensibilisation à ce domaine, mais aussi à la multiplication des travaux de synthèse tels que le présent rapport, de communications publiques visant à promouvoir la thématique en cause, etc.

En matière de réglementation, de premières opportunités existent déjà en France et en Europe pour prendre en compte le rôle des pollutions sonores d'origine anthropique en matière d'impact sur la biodiversité, par exemple dans le cadre des Plans de prévention du bruit dans l'environnement (PPBE), des Plans d'action pour le milieu marin (PAMM), des études d'impact et de la gestion des sites Natura 2000. Bruitparif encourage les parties prenantes de ces types de dispositifs à tirer parti de ces possibilités afin que l'impact potentiel de la pollution sonore sur la nature soit systématiquement étudié en fonction des travaux scientifiques

existants, et attire aussi l'attention des autorités publiques et en particulier du pouvoir judiciaire en la matière.

Au-delà, Bruitparif se déclare favorable à toute initiative qui permettrait d'étendre les réglementations pour la protection des êtres humains contre le bruit à d'autres espèces afin de contribuer à la préservation de la biodiversité, ceci dans la logique des principes de prévention et de précaution. En tout état de cause, les informations collectées dans le présent rapport montrent qu'il est plus que probable que la maîtrise des pollutions sonores soit favorable à la biodiversité comme elle l'est pour les populations humaines. Il apparaît donc louable de faire en sorte que toutes les opérations visant à cette maîtrise prennent en compte la réduction de l'exposition au bruit de l'ensemble des éléments du monde vivant.

BIBLIOGRAPHIE

L'ensemble des sources utilisées par cette étude n'a pu être rassemblé dans la présente orientation bibliographique. Nous y présentons cependant certaines des sources utilisées, notamment lorsqu'elles sont rédigées en français, bien que l'essentiel des sources utilisées par ce rapport d'étude soit rédigé en langue anglaise. Le lecteur trouvera par ailleurs la plupart des références de travaux scientifiques cités directement dans le texte de l'étude.

Acoustique et techniques, n°61

N. Barrière, J. Defrance, La forêt : « Un écran anti-bruit météorologique », *Acoustiques et techniques*, n°23, 2000, page 41-48.

B. T. Barton, M. E. Hodge, C. J.S. Peights, A. M. Autrey, M. A. Lashley et V. P. Klink, Testing the AC/DC hypothesis: Rock and roll is noise pollution and weakens a trophic cascade, *Ecology and evolution*, 2018, n°8, issue 15, p 7649-7656.

J. P. Bunkley, C. J. W. Mc Clure, N. J. Kleist, C.D. Francis et J. R. Barber, Anthropogenic noise alters bat activity levels and echolocation calls, *Global Ecology and Conservation*, 2015, n°3, p 62-71.

Rachel T. Buxton, Megan F. McKenna, Daniel Mennitt, Kurt Fristrup, Kevin Crooks, Lisa Angeloni et George Wittemyer, Noise pollution is pervasive in U.S. protected areas, *Science*, 2017, n°356, issue 6337, p 531-533.

V. Z. Caorsi, C. Both, S. Cechin, R. Antunes et M. Borges-Martins, Effects of traffic noise on the calling behavior of two Neotropical hylid frogs, *PLOS ONE*, 2018, n° 13.

S. Chavaud et col, *Impact des sons anthropiques sur la faune marine*, Quae, 2018

Coll., *Ocean Noise and Marine Mammals*, the national academies press, 2003.

Guillaume Dutilleul et Anaïs Fontaine, Rapport d'étude « Bruit routier et faune sauvage », Cerema, juillet 2015.

Écho bruit, n°154

Écho bruit, n°155

Écho bruit, n°159

Clinton D. Francis, Nathan J. Kleist, Catherine P. Ortega et Alexander Cruz, Noise pollution alters ecological services: enhanced pollinisation and disrupted seed dispersal, *Proceedings of The Royal Society B*, 2012, n°279, issue 1739.

Brian Gilligan, Growing grass and reducing noise: City of Chicago's green roof Program, 2 mars 2005 (présentation: O'Hare Noise Compatibility Commission).

Lilach Hadany, Dr. Yuval Sapir et Dr. Yossi Yovel, Les fleurs peuvent entendre les insectes, *Université de Tel-Aviv*.

Disponible sur : [www.ami-universite-telaviv.com/index.php/2013-05-26-08-41-](http://www.ami-universite-telaviv.com/index.php/2013-05-26-08-41-51/recherche/sciences/biologie/972-les-fleurs-peuvent-entendre-les-insectes,-d-apr%C3%A8s-une-%C3%A9tude-de-l-universit%C3%A9-de-tel-aviv)

[51/recherche/sciences/biologie/972-les-fleurs-peuvent-entendre-les-insectes,-d-apr%C3%A8s-une-%C3%A9tude-de-l-universit%C3%A9-de-tel-aviv](http://www.ami-universite-telaviv.com/index.php/2013-05-26-08-41-51/recherche/sciences/biologie/972-les-fleurs-peuvent-entendre-les-insectes,-d-apr%C3%A8s-une-%C3%A9tude-de-l-universit%C3%A9-de-tel-aviv)

<http://capitale-biodiversite.fr/experiences/vegetalisation-dun-mur-antibruit>

<https://isolation.ooreka.fr/astuce/voir/732505/mur-vegetal-anti-bruit>

Ulrike Lampe, Tim Schmoll, Alexandra Franzke et Klaus Reinhold, Staying tuned: grass hoppers from noisy road side habitats produce courtship signals with elevated frequency components, *Functional Ecology*, 2012, n°26, issue 6, p 1348-1354.

Le bruit en milieu marin aveugle et tue les céphalopodes, les crustacés, les coquillages..., Association Gardez les Caps. Disponible sur <http://gardezlescaps.org/le-bruit-en-milieu-marin-aveugle-et-tue-les-cephalopodes-les-crustaces-les-coquillages>

Daphnée Lepertois, Les mers ont des oreilles, *CNRS Le Journal*. Disponible sur <https://lejourn.cnr.fr/articles/les-mers-ont-des-oreilles>

J. Tate Mason, Christopher J.W. Mc Clure et Jesse R. Barber, Anthropogenic noise impairs owl hunting behavior, *Biological Conservation*, 2016, n°199, p 29-32.

Robert D. Mc Cauley, Ryan D. Day, Kerrie M. Swadling, Quinn P. Fitzgibbon, Reg A. Watson et Jayson M. Semmens, Widely used marine seismic survey air gun operations negatively impact zooplankton, *Nature Ecology & Evolution*, 2017, n°195.

Christopher J.W. McClure, Heidi E. Ware, Jay Carlisle, Gregory Kaltenecker et Jesse R. Barber, An experimental investigation into the effects of traffic noise on distributions of birds: avoiding the phantom road, *Proceedings of The Royal Society B*, 2013, n°280, issue 1773.

Solène Marry, Muriel Delabarre, Naturalité urbaine : L'impact du végétal sur la perception sonore dans les espaces publics, HAL (archives-ouvertes.fr), 2012.

Jean-Charles Massabiau et al., 2017 : www.u-bordeaux.fr/Actualites/De-la-recherche/Les-huitres-sensibles-au-bruit

Alizée Meillère, François Brischoux, Cécile Ribout et Frédéric Angelier, Traffic noise exposure affects telomere length in nestling house sparrows, *Biology Letters*, 2015.

Nima Nejadrezaei, Rick GethroMacajoux, The Effect of Vegetation on Noise Pollution (Case study of Mount-Saint-Aignan, Normandie, France).

Gulia Preeti et Gupta Arpan, Traffic noise control by periodically Arranged trees, International Conference On Recent Trends and Developments in Environmental Sustainability, 2016

Nathan J. Kleist, Robert P.G uralnick, Alexander Cruz, Christopher A. Lowry et Clinton D. Francis, Chronic anthropogenic noise disrupts glucocorticoid signaling and has multiple effects on fitness in an avian community, *PNAS*, 2018, n°115, p 648-657.

Graeme Shannon, Lisa M. Angeloni, George Wittemyer, Kurt M. Fristrup et Kevin R. Crooks, Road traffic noise modifies behavior of a keystone species, *Animal Behavior*, 2014, n°94, p 135-141.

Popper A.N., Smith M.E., Cott P.A., Hanna B.W., Macgillivray A.O., Austin M.E. et Mann D.A., Effects of exposure to seismic air gun use on hearing of three fish species, *The journal of the Acoustical Society of America*, 2005, n°117, p 3958-3971.

W. J. Richardson, Charles R. Greene Jr, Denis H. Thomson et Charles I. Malme, *Marine mammals and noise*, 1995.

Rosalind M. Rolland, Susan E. Parks, Kathleen E. Hunt, Manuel Castellote, Peter J. Corkeron, Douglas P. Nowacek, Samuel K. Wasser et Scott D. Kraus, Evidence that ship noise increases stress in right whales, *Proceedings of The Royal Society B*, 2012, n°279, issue 1737.

H. Slabbekoorn et al., *Effects of Anthropogenic Noise on Animals*, Springer, 2018.

H. Slabbekoorn et M. Peet, Birds sing at a higher pitch in urban noise, *Nature*, 2003, n°424, p 267-268.

Jennifer W. C. Sun et Peter M. Narins, Anthropogenic sounds differentially affect amphibian call rate, *Biological Conservation*, 2005, n°121, p 419-427.

Samara Theano et Tsitsoni Thekla, The effects of vegetation on reducing traffic noise from a city ring road, *Noise control Engineering Journal*, 2011, n°59 issue 1, pages 68-74. Voir

www.researchgate.net/publication/259459894 [The effects of vegetation on reducing traffic noise from a city ring road](#)

Jean-Marc Thirion, Florian Doré et Jean Sériot, Impact sur la pollution sonore, *Le courrier de la nature*, 2010, n°254, p 32-37.

M. Troïanowski, N. Mondy, A. Dumet, C. Arcanjo C et T. Lengagne, Effects of traffic noise on treefrog stress levels, immunity, and color signaling, *Conservation Biology*, 2017, n°31, p 1132-1140.

Une technologie intelligente pour mesurer l'exposition au bruit des animaux du zoo d'Helsinki, *Inria*. Disponible sur www.inria.fr/centre/paris/actualites/ambiciti-mesure-l-exposition-au-bruit-des-animaux-du-zoo-d-helsinki

Timothy Van Renterghem, Dick Botteldooren, Reducing the acoustical facade load from road traffic with green roofs, *Building and environment*, 2009, n°44, p1081-1087

Irina N. Vasilyeva, Vladimir G. Bupalov, Alexander L. Semenov, Denis A. Baranenko et Valery N. Zinkin, The Effects of Low-Frequency Noise on Rats: Evidence of Chromosomal Aberrations in the Bone Marrow Cells and the Release of Low-Molecular-Weight DNA in the Blood Plasma, *Noise and Health*, 2017, n°19, issue 87, p 79-83.

Barrière Nicolas, Defrance Jérôme, "La forêt : Un écran anti-bruit météorologique", *Acoustique et techniques*, n°24, 2001, pages 34-40.

www.naturawall.fr/le-mur-anti-bruit.html

www.ville-antony.fr/parc-alisiers

Hongseok Yang, Minsung Choi, Jian Kang, *Internoise 2010: Laboratory study of the effects of green roof systems on noise reduction at street levels for diffracted sound.*

ANNEXE

Par Élisabeth Devillard, docteur en biologie moléculaire et cellulaire et sciences de la santé

Le bruit généré par les activités humaines se retrouve partout et impacte tous les écosystèmes de la planète. De nombreuses études scientifiques montrent que l'exposition chronique du bruit affecte la capacité des animaux à communiquer, avec de diverses répercussions – choix des partenaires, échanges entre parents et petits, recherche de proies, vigilance contre les prédateurs, défense du territoire, etc. – ainsi que sur la capacité des animaux à se nourrir et à se reproduire [1].

Par ailleurs, de plus en plus d'études mettent l'accent sur le stress* engendré par l'exposition chronique au bruit chez les animaux, ce qui affecte l'état sanitaire de l'ensemble de la biodiversité [2]. Cependant, peu d'études scientifiques permettent de connaître les mécanismes physiopathologiques induits par le stress produit par l'exposition chronique au bruit chez les animaux [3].

Une première étude réalisée par A. Meillere et al. chez le Moineau domestique en France permet de relier inflammation et stress* dus à l'exposition au bruit routier et vieillissement prématuré sans aucune modification morphologique. En effet, si l'on compare les caractéristiques d'oisillons soumis au bruit routier dans leurs nids à celles d'oisillons qui n'y sont pas soumis, on constate dans des conditions expérimentales définies, une diminution de la longueur des télomères : ces télomères ont pour fonction de protéger les extrémités des chromosomes, leur absence induisant une perte rapide d'informations génétiques nécessaires au fonctionnement cellulaire. Cette diminution est due à une augmentation du stress oxydatif avec augmentation de radicaux libres intercellulaires, ce qui induit des altérations moléculaires de l'ADN cumulées à l'action prématurée de la corticostérone sur les oisillons, qui engendre stress* cellulaire et inflammation.

L'étude réalisée chez la Rainette verte par M. Troïanowski et al. permet de relier exposition au bruit routier et immunosuppression. En effet, dans des conditions expérimentales établies par les auteurs, les rainettes mâles placées dans une pièce soumise à du bruit routier voient leur taux de corticostérone salivaire (puissant immunosuppresseur) augmenté de 63 %, ce qui induit une diminution de la réponse immunitaire par rapport aux rainettes placées dans une pièce sans bruit routier.

Chez l'espèce humaine, de nombreuses études

épidémiologiques ont depuis plus de dix ans clairement établi le lien entre exposition chronique au bruit et développement de maladies cardiovasculaires et métaboliques. L'exposition chronique au bruit entraîne une fatigue auditive et un stress* induisant des effets extra auditifs plus difficiles à identifier, puisqu'ils peuvent être liés à d'autres éléments stressants avec des seuils de tolérance différents d'un individu à l'autre pour un même environnement. De nombreuses personnes sont exposées à des seuils critiques pour leur santé avec pour effets des perturbations du sommeil, une majoration de cardiopathies et pathologies liées à l'immunité, des problèmes de santé mentale et d'apprentissage, dont les effets délétères et les mécanismes biologiques associés sont largement méconnus. Les études permettant d'identifier les mécanismes physiopathologiques dus à l'exposition chronique au bruit chez l'homme sont réalisées sur des modèles animaux (expériences chez le rat et la souris) dont la physiopathologie est similaire à celle de l'être humain. Il est possible d'en extrapoler à l'homme les résultats expérimentaux.

Dans deux expériences conduites par Wang R et al. [4], après avoir soumis ou non 49 rats pendant 28 jours et pendant quatre heures par jour à une source de bruit (100 dB), il apparaît une surproduction persistante de nombreuses molécules en fonction du screening moléculaire de l'organe scanné (cerveau, foie, intestin).

Au niveau du cortex cérébral et de l'hippocampe, il a été observée une surproduction persistante de molécules impliquées dans les pathologies de type Alzheimer (peptide A β , peptide APP, sécrétases β et γ , protéine gliale acide fibrillaire, protéines du complexe CRF/p-tau), associée à la surexpression de protéines inflammatoires marqueurs de neuroinflammation et de stress* oxydatif tel que le TNF α , RAGE, ainsi que la diminution de deux protéines neuroprotectrices Actine A et DDGF AA. Il en résulte donc que l'exposition chronique au bruit durant une vie pourrait accélérer le développement de pathologies de type Alzheimer du fait de l'installation progressive d'un état inflammatoire cérébral, qui est associée à la surproduction et à l'accumulation dans le cerveau de nombreuses protéines dont le peptide amyloïde, ce qui entraîne un dysfonctionnement progressif de cet organe.

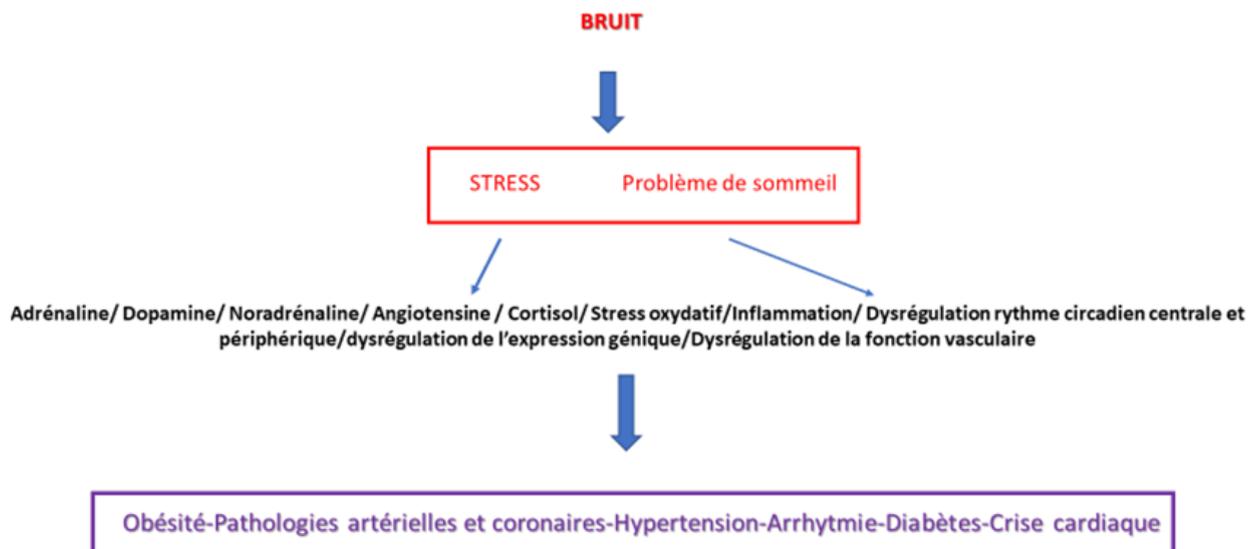
Au niveau du foie et de l'intestin, il a été observée une augmentation persistante de molécules contribuant à la résistance à l'insuline (cause de diabète) entraînant une dérégulation persistante du métabolisme glucidique du fait de l'activation de la

voie de signalisation IRS–AKT–GSK3 β . On observe également l'installation d'un état inflammatoire due à la présence de molécules pro-inflammatoires tel que IgA, IL-1 β ou TNF α , ceci en parallèle avec une modification-altération de la flore intestinale bactérienne spécifique (Roseburia versus Faecalibacterium). Il en résulte donc que l'exposition chronique au bruit durant une vie pourrait faciliter le développement de syndromes métaboliques incluant l'obésité et le diabète.

En réalisant des travaux sur des souris exposées à du bruit aérien (72 dB) pendant quatre jours, l'équipe de Münzel al. [5], a trouvé une corrélation entre cardiopathies et exposition au bruit du fait de l'augmentation du taux circulant de nombreuses molécules (angiotensine 2, il6, plasma 3 nitrotyrosine, Foxo, endothelial nitric oxide synthetase, phagocytic NADPH oxidase...) et hormones (cortisol, dopamine, adrénaline...). Il en résulte que le stress* généré par l'exposition chronique au bruit nocturne déclenche un stress*

oxydatif au niveau cérébral, cardiaque et vasculaire, suivi par une inflammation neuronale ; au niveau du réseau vasculaire, on relève une activation de la voie de signalisation Angiotensine II, ce qui entraîne des risques de cardiopathies. Un screening moléculaire complet permet de comprendre l'origine de ces physiopathologies : en effet, il a été mis en évidence un changement du profil d'expression de plus de 100 gènes impliqués dans des fonctions biologiques très importantes : rythme circadien*, apoptose*, croissance cellulaire, fibrose, inflammation, défense contre les pathogènes, facteurs de transcription, phosphatases spécifiques impliquées dans les voies de signalisation NFKB et FOXO.

En modifiant le rythme circadien – horloge interne nichée au cœur du cerveau et resynchronisée en permanence sur un cycle de 24h00 –, l'exposition chronique au bruit nocturne dérégule de nombreuses fonctions biologiques importantes, ce qui explique ces pathologies.



Références de l'annexe

[1]

1. Effects of traffic noise on the calling behavior of two Neotropical hylid frogs. Valentina Zaffaroni Caorsi, Camila Both2, Sonia Cechin, Rogger Antunes, Marcio Borges-Martins. PLoS ONE 12(8): e0183342-2017.
2. Anthropogenic Noise and Conservation McGregor PK, Horn AG, Leonard ML, Thomsen F. In: Brumm H, editor. Animal Communication and Noise. Berlin, Heidelberg: Springer; (2013). pp. 409±444.
3. A synthesis of two decades of research documenting the effects of noise on wildlife. Shannon G, McKenna MF, Angeloni LM, Crooks KR, Fristrup KM, Brown E, et al. Biol Rev. (2016); 91: 982±1005.
4. Birds sing at a higher pitch in urban noise. Slabbekoorn H, Peet M. Nature. 52003; 424: 267.
5. Effects of traffic noise on the calling behavior of two Neotropical hylid frogs. Valentina Zaffaroni Caorsi, Camila Both, Sonia Cechin, Rogger Antunes, Marcio Borges-Martins. (2017) PLoS ONE 12(8)
6. Anthropogenic noise impairs owl hunting behavior. Mason JT, Maclure JCW et al. (2016) Biological Conservation.199 :29-32.

[2]

1. Chronic anthropogenic noise disrupts glucocorticoid signaling and has multiple effects on fitness in an avian community. Nathan J. Kleista, b,1, Robert P. Guralnickc, Alexander Cruza, Christopher A. Lowryd,e, and Clinton D. Francisf; (2018) . Proc Natl Acad Sci USA 115: E648–E657

[3]

1. Traffic noise exposure affects telomere length in nestling house sparrows. Alizée Meillère, François Brischoux, Cécile Ribout, and Frédéric Angelier . Biol Lett. 2015 Sep; 11(9): 20150559.
2. Effects of traffic noise on tree frog stress levels, immunity, and color signaling. M. Troianowski, N. Mondy, A. Dumet, C. Arcanjo, T. Lengagne. Conserv Biol. 2017 Oct;31(5):1132-1140.

[4]

1. Effects of chronic noise on glucose metabolism and gut microbiota– host inflammatory homeostasis in rats. Bo Cui, Zhihui Gai, Xiaojun She, Rui Wang& Zhuge Xi. Sci Rep.2016 Nov 4;6:36693.
2. Chronic Noise Exposure Acts Cumulatively to Exacerbate Alzheimer's Disease-Like Amyloid-β Pathology and Neuroinflammation in the Rat Hippocampus. Cui B,Li K,Gai Z,She X,Zhang N,Xu C,Chen X,An G,Ma Q,Wang R. Sci Rep.2015 Aug 7;5:12943.
3. Effects of chronic noise on mRNA and protein expression of CRF family molecules and its relationship with p-tau in the rat prefrontal cortex. Gai Z, Li K, Sun 2, She X, Cui B, Wang R. J Neurol Sci. 2016 Sep 15;368:307-13.

[5]

1. Münzel T, Daiber A, Steven S, Tran LP, Ullmann E, et al. 2017. Effects of noise on vascular function, oxidative stress, and inflammation: mechanistic insight from studies in mice. Eur. Heart J. 38:2838–49.
2. Münzel T, Schmidt FP, Steven S, Herzog J, Daiber A, Sørensen M. 2018. Environmental noise and the cardiovascular system. J. Am. Coll. Cardiol. 71:688–97.
3. Kröller-Schön S, Daiber A, Steven S, Oelze M, Frenis K, et al. 2018. Crucial role for Nox2 and sleep deprivation in air craft noise induced vascular and cerebral oxidative stress, inflammation, and gene regulation. Eur. Heart J. 39:3528–39.
4. Thomas Münzel, Swenja Kröller-Schön, Matthias Oelze, Tommaso Gori, Frank P. Schmidt, Sebastian Steven, Omar Hahad, Martin Rössli, Jean-Marc Wunderli, Andreas Daiber, and Mette Sørensen. Adverse Cardiovascular Effects of Traffic Noise with a Focus on Nighttime Noise and the New WHO Noise Guidelines. December 30, 2019. Annual Reviews.

BRUIT ET BIODIVERSITÉ

MARS 2020

BRUITPARIF

CENTRE D'ÉVALUATION TECHNIQUE
DE L'ENVIRONNEMENT SONORE EN ÎLE-DE-FRANCE

Axe Pleyel 4 – B104
32 boulevard Ornano
93200 Saint-Denis

01 83 65 40 40

demande@bruitparif.fr



BRUITPARIF