

Un panorama des ondes non ionisantes acoustiques (ONIA) et de leurs principaux usages

Par Paul AVAN

Université Clermont Auvergne, Institut de l'audition

Parmi les agents physiques, les ondes ont la capacité de se propager, véhiculant avec elles de l'information, mais aussi, parfois, un danger lié à leur énergie ou aux transformations qu'elles induisent. Les ondes acoustiques sous-tendent l'audition, un sens privilégié pour la communication intra et inter-espèces, magnifié par l'espèce humaine qui en fait le support de la parole et de la musique. Le pouvoir de nuisance voire de dangerosité des ondes sonores audibles, lorsqu'elles viennent interférer, de manière souvent insidieuse, avec le confort ou la santé des individus exposés, est un des grands problèmes de santé des décennies à venir, comme le met en exergue l'OMS. Mais l'acoustique engendre aussi des progrès pour la santé en permettant, dans des intervalles d'hyperfréquences non utilisés par l'audition, la mise en œuvre de techniques d'imagerie du corps dépourvues de danger et de très haute résolution, et qui sont en outre peu coûteuses et donc accessibles aux pays les plus démunis.

Introduction

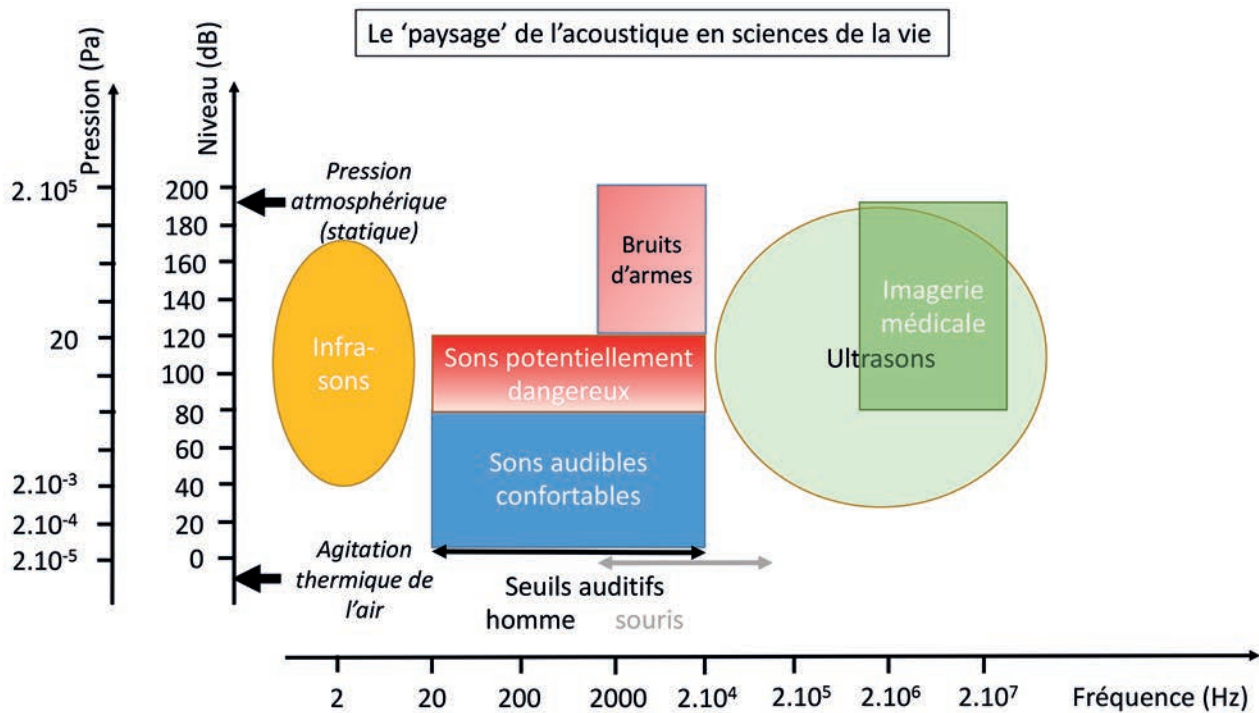
Les ondes acoustiques usuelles présentent deux singularités par rapport à de nombreux agents physiques : une se rapporte au monde physique et l'autre au monde biologique au carrefour desquels elles se situent. Leur domaine physique couvre une étendue énergétique de l'ordre de 200 décibels, soit 10^{20} ou cent milliards de milliards, un intervalle de fréquences ou spectre allant de quelques fractions de hertz à quelques dizaines de millions de hertz (vibrations par seconde) pour les applications les plus courantes (voir la figure de la page suivante). Ces ondes servent de supports physiques à la propagation d'énergie et d'informations. En biologie, les ondes acoustiques ont le statut privilégié de vecteur d'un sens primordial pour la survie des espèces, l'audition, prolongeant sa version primitive qu'est la mécanosensibilité déjà présente chez des formes primitives de vie porteuses de mécanorécepteurs, à savoir des plantes aux polypes coralliens. L'audibilité confère aux ondes acoustiques leur intérêt pour la vie sociale et l'interaction avec l'environnement, mais aussi leur pouvoir de nuisance ou de dangerosité lorsqu'elles viennent interférer avec le confort ou la santé des individus exposés. Un certain nombre de règles encadrant les ondes acoustiques d'un point de vue sanitaire sont fondées sur ce pouvoir d'interférence (voir l'Encadré de la page 14). Comme toute pollution, celle associée aux ondes acoustiques, essentiellement d'origine humaine, affecte un écosystème : l'homme mais aussi des éléments vivants de son environnement.

Audible ou pas, le son provient d'une variation de pression dans un milieu matériel, qui se propage sous forme d'ondes longitudinales à une vitesse fixe c , caractéristique du milieu (340 m/s dans l'air en conditions normales de température et pression). Les ondes sonores suivent les mêmes lois physiques et acoustiques quelle que soit leur fréquence f ou leur longueur d'onde λ ($= c/f$), cette dernière étant la distance entre deux zones de compression consécutives dans le milieu. Les ondes sonores peuvent se propager à distance et en cours de route, être déviées (réfléchies, diffusées ou diffractées) ou atténuées selon des principes ondulatoires généraux dans lesquels λ joue un rôle clé.

Son et imagerie

Dans toutes ces applications, la pénétration non invasive et la directivité sont les performances-clés offertes par les ultrasons.

L'utilisation des sons adéquats pour imager le corps humain de manière à la fois peu coûteuse, légère et non invasive a révolutionné la médecine de la fin du XX^e siècle. Les sons se réfléchissent pour produire des échos chaque fois que la densité (techniquement, l'impédance) du milieu propagateur change. Cependant, ils ne se propagent pas en ligne droite en raison du phénomène de diffraction qui leur permet de contourner et, ainsi, d'effacer les obstacles plus petits que leur longueur d'onde (λ). C'est un ultrason de longueur d'onde sub-millimétrique (quelques



Le paysage bidimensionnel (les niveaux et les fréquences) de l'acoustique en sciences de la vie.

mégahertz) qui permet d'imager les tissus mous du corps humain (et parfois, les os et les cartilages) avec une résolution anatomique efficace. La pénétration des ultrasons diminue lorsque la longueur d'onde diminue, mais les systèmes d'imagerie médicale exploitent un compromis. L'imagerie doppler complète l'analyse par celle des changements subtils de fréquence, lorsque les cibles ultrasonores diffusantes se déplacent.

Des diagnostics fonctionnels ou anatomiques en obstétrique, cardiologie et autres disciplines médico-chirurgicales, sont devenus possibles y compris dans des pays pauvres, grâce aux équipements placés entre les mains d'opérateurs formés. Lorsque l'onde ultrasonore focalise une énergie intense, elle peut fragmenter un calcul de l'extérieur sans chirurgie (lithotripsie), vaporiser une lésion également sans effraction (bistouri ultrasonore) ou réchauffer un tissu. D'autres modes de vibrations non sonores déclenchés par une onde de choc sonore créant un cisaillement tissulaire permettent désormais un diagnostic élastométrique précieux en cancérologie. Les normes de sécurité n'entravent pas une utilisation obstétricale efficace chez un fœtus en développement.

Ondes acoustiques et audition

L'audition des mammifères terrestres en fonctionnement normal couvre un spectre allant de quelques hertz à quelques dizaines de milliers de hertz, soit 20 à 20 000 Hz pour l'espèce humaine. Le vocabulaire acoustique est anthropomorphe : c'est en référence à cet intervalle que l'on parle d'ultrasons, au-dessus, et d'infra-sons, au-dessous. La gamme d'intensités audibles est extrêmement large, allant de 20 micropascals, correspondant au seuil de détection moyen, jusqu'à 20 pascals, pour le seuil maximal tolérable sans danger immédiat. Des niveaux d'intensi-

té non immédiatement dangereux peuvent présenter un effet lésant à long terme, effet qui est dose-dépendant : plus concrètement, **l'énergie totale reçue pendant une journée ne devrait pas dépasser les 80 dB(A)** (voir l'Encadré de la page suivante) pendant 8 heures, sous peine, en cas de cumul tout au long de la vie, d'accélérer le vieillissement auditif. Le système auditif est utilisé pour détecter des signaux d'alerte, de faible niveau quand le danger est encore lointain, et pour communiquer avec des partenaires de la même espèce (la parole et la musique chez l'homme ; le brame du cerf, le chant des oiseaux, etc.) ou d'une autre espèce (sifflements et appels des bergers à destination de leurs troupeaux, cris de geais qui alertent les oiseaux alentour de la présence d'un rapace). Le système auditif est certes capable d'extraire par filtrage les messages pertinents dans un paysage sonore complexe (l'effet *cocktail party*), mais une pollution sonore peut rendre cette tâche épuisante et induire un stress, préjudiciable non pas forcément à l'audition, mais à la santé : le bruit a donc des effets nuisibles extra-auditifs.

Des normes protectrices ont été édictées dans des cadres d'exposition professionnelle, mais les dangers des sons forts concernent aussi, au XXI^e siècle, les activités de loisirs, ce qui, selon l'OMS, soulève des questions majeures de prévention et de traitement. Qui plus est, certaines lésions auditives peuvent être diagnostiquées très tard, voire passer inaperçues et n'être découvertes que *post mortem*. Les éléments vulnérables du système auditif sont beaucoup plus nombreux que ce que l'on avait pu identifier il y a quelques décennies, et les mécanismes de vulnérabilité sont non seulement mécaniques ou neurochimiques, mais aussi osmotiques, inflammatoires, métaboliques, etc. Leur identification est possible grâce à de nouvelles méthodes qui permettent de détecter des facteurs d'hypersensibilité (génétiques, notamment) et de dessiner des stratégies de

Les institutions et les procédures qui encadrent l'utilisation des ondes acoustiques d'un point de vue sanitaire

L'encadrement sanitaire des ondes acoustiques s'est d'abord concentré sur la sécurité pour l'audition de personnes exposées au bruit dans le cadre de leur travail, établissant un niveau limite de 80 dB (A) (A est une pondération qui prend en compte les sons en fonction de leur audibilité par l'homme), en cas d'exposition de façon continue sur une durée de 8 h de travail, 5 jours par semaine, 47 semaines par an et pour 40 années d'activité. La règle isoénergie est appliquée, en vertu de laquelle on considère que la dose de bruit admissible correspond à l'énergie totale reçue par jour, sa distribution exacte dans le temps important peu. L'exposition dans le cadre des loisirs présente les mêmes dangers potentiels, mais elle n'est pas véritablement encadrée. La prise en compte d'éléments aggravants possibles comme le contenu en basses fréquences, voire en infrasons inaudibles, en impulsions intenses, ou l'existence de co-expositions ototoxiques reste l'objet de débats.

Le cadre législatif actuel couvre également le champ très riche et complexe des bruits ou des vibrations qui, sans être dangereux pour l'audition, sont de nature à porter atteinte à la qualité de vie ou de sommeil des personnes exposées, nuisant ainsi à leur santé ou à leur droit à vivre dans un environnement confortable. Ce cadre s'applique à des domaines divers : urbanisme, acoustique des bâtiments avec renforcement des normes d'isolation phonique dans les zones affectées par les transports terrestres ou aériens bruyants ou lorsque les populations fréquentant ces bâtiments ont des besoins spécifiques (locaux d'enseignement). Les objets source de bruits, que ce soit des machines, des appareils reproducteurs de musique ou des jouets, ont vu leur commercialisation soumise au respect de niveaux acoustiques limites régis par des directives internationales. Enfin, la diffusion de musique dans les lieux publics voit la réglementation applicable évoluer au regard des niveaux acoustiques, même si les niveaux tolérés dépassent encore allègrement les 100 dB.

diagnostic précoce et de traitement. C'est le rôle dévolu aux instituts monothématiques pluri-équipes, qui regroupent les compétences nécessaires pour permettre des avancées rapides et décisives dans le domaine. En France, l'ouverture en 2020 de l'Institut de l'audition à Paris, un centre rattaché à l'Institut Pasteur et soutenu par la Fondation pour l'audition, participe à relever ce défi. L'OMS anticipe sur ce point que près d'un milliard de personnes seront concernées par un problème d'audition en 2050.

Pourquoi cette complexité du système auditif ? « Les nouvelles découvertes des Anatomistes ont augmenté l'embarras, et nous ont [plongé plus encore] dans le doute, en développant à nos yeux un organe si compliqué qu'il faut employer un temps considérable, les recherches les plus délicates et les plus assidues, pour connaître les détours de cet organe... L'on peut donc assurer que ce sujet servira d'occupation infructueuse aux siècles à venir... », écrivaient les Encyclopédistes à la rubrique « Ouïe ». La détection auditive résout des difficultés physico-biologiques majeures : passage des vibrations du milieu extérieur (aérien pour les animaux terrestres) vers le milieu intérieur tissulaire, décomposition des sons selon leur spectre fréquentiel et leurs caractéristiques temporelles fines, déclenchement de mécanorécepteurs de sensibilité sub-nanométrique au seuil auditif, puis analyse par les centres auditifs d'informations superposées ou juxtaposées issues de sources en compétition : extraction de *percepts* de base, force sonore, hauteur et timbre, mais aussi des données plus subtiles comme la direction d'une source ou sa distance. Le manchot royal repère son conjoint à son cri au milieu d'une colonie de dizaines de milliers d'oiseaux, et le chef conduit son orchestre grâce à son écoute de chacun des instruments. L'amplification sélective en termes de fréquence des sons faibles, ce qui les rend détectables, doit être conciliée avec la capacité à coder des sons dont l'énergie peut s'exprimer en douze ordres de grandeur plus élevés que le seuil de détection, grâce à une compression issue du mécanisme même des protéines mécanoréceptrices. Des processus intracellulaires raffinés assurent la maintenance des structures, leur accord précis pour que celles-ci conservent leurs propriétés de résonance ou l'élimination de sous-produits toxiques issus du fonctionnement du système auditif (en effet, celui-ci ne s'arrête jamais : des neurones de l'audition produisent des centaines de décharges par seconde sans discontinuer pendant toute la vie, un exploit unique).

Par ailleurs, certaines protéines-clés de la mécanotransduction auditive humaine existent chez l'anémone de mer, dont l'embranchement, celui des Cnidaires, remonte au précambrien, il y a 600 millions d'années. Le système auditif comporte ainsi des complexes moléculaires hautement spécialisés, aboutissements de la sélection naturelle recyclés au gré des besoins à mesure de l'évolution, que l'on peut retrouver dévolus à des fonctions très différentes, par exemple au niveau du système visuel ou du cortex. Cette évolution permet aussi une convergence, de sorte que des fonctions similaires puissent être accomplies par des systèmes différents : ainsi, les plantes peuvent être dotées de récepteurs sonores. La bioacoustique des plantes commence d'ailleurs à aborder des sujets nourris par la réflexion sur le rôle possible de la sélection naturelle. Si les plantes ne pu, en co-évoluant avec leurs pollinisateurs, développer des feuilles réfléchissant mieux les sons et devenir ainsi plus attractives pour des écholocalisateurs de plus en plus adaptés, seraient-elles capables de répondre à des sons ou à des vibrations significatifs pour leur croissance, comme le bruit de l'eau qui s'écoule ?

Une réflexion fondée sur l'évolution soulève aussi de graves alarmes. Les conditions de la vie moderne induisent des changements brutaux de l'environnement, avec des niveaux acoustiques et des types de sons qui étaient encore étrangers à l'écosystème humain en 1990 : densité exponentiellement croissante des populations et des industries, essor des expositions sonores polluantes à des fréquences hors de l'intervalle naturel (infrasons) ou aux caractéristiques très artificielles (musique amplifiée surcompressée et suramplifiée en basses fréquences). Pour permettre aux êtres vivants de trouver des parades en adaptant leurs modes de communication acoustique ou leurs mécanismes protecteurs, il faut plusieurs générations... L'augmentation de la pression de la chasse combinée aux effets du réchauffement climatique s'est faite sur un temps suffisamment long, une soixantaine d'années, pour permettre à des sous-populations de cigognes génétiquement non migratrices de commencer à assurer leur prévalence sur leurs cousines migratrices. Dans le cas des ambiances acoustiques, les changements d'environnement ont eu lieu en moins de vingt ans.

Est-ce à dire que l'être humain est condamné à vivre dans un environnement acoustique dégradé et dangereux ? Clairement oui, selon l'OMS, qui nous projette en 2050 avec un milliard d'individus menacés de surdité. Les pathologies de l'audition sont donc une conséquence fatale, dont la prévalence croît avec l'industrialisation. L'immense complexité du système auditif est synonyme de lésions très variées, de « remèdes » (pour le moment, palliatifs) différents selon la lésion, et donc de besoins accrus en matière de dépistage, de diagnostics précis, sachant que des pistes de traitement authentique émergent des approches issues de la physiologie moléculaire.

Est-ce une question secondaire que de vouloir améliorer le sort des sourds, dont le handicap n'affectant « que » la communication était naguère sous-estimé ? Cette vue lénifiante passiste n'est plus crédible : la surdité n'est autre que le premier facteur de risque (modifiable) de démence. La démence représente un coût social et économique terrifiant et en augmentation, la surdité aussi.

Est-ce rassurant de savoir qu'en France, 7 millions de personnes auront tôt ou tard besoin d'un appareillage auditif, alors que pas un appareil de ce type n'est fabriqué en France ? Non, mais il est trop tard pour s'en alarmer. Accepter qu'en France, les chercheurs rassemblés pour constituer l'Institut de l'audition ou des structures simi-

lares devraient compter sur des industriels extra-territoriaux pour produire les traitements et les diagnostics qu'ils ont découverts et brevetés ne serait pas défendable. C'est pourquoi la création de cet Institut a notamment pour objectif d'inverser la désindustrialisation qui mine le domaine biomédical en combinant approches scientifiques, validation clinique, enseignement actualisé et transfert à l'industrie, le tout adossé à l'Institut Pasteur.

Sons et nuisances

L'émission d'ondes acoustiques en tant que sous-produits d'une activité a comme contrepartie la propagation à distance, qui n'est pas forcément facile à contrôler et est source de nuisances, notamment lorsque les ondes empiètent sur le domaine audible de l'homme ou d'un acteur de son écosystème. Il peut en résulter plusieurs mécanismes, le plus évident étant une agression directe de l'organe auditif avec un risque de lésions à court, moyen ou long termes. Dans ces deux derniers cas, l'imputabilité au son pourra être contestée...

Parmi les effets indirects de sons indésirables, le son polluant non lésant induit une gêne. Celle-ci peut avoir des conséquences néfastes pour la santé à long terme, par des actions sur le stress, la fatigabilité, le sommeil, la tension artérielle, etc. L'imputabilité et la quantification de ces conséquences sont délicates, car le bruit et d'autres polluants (chimiques et visuels) souvent se combinent et n'ont qu'un effet global, et ce seulement sur le long terme. Un hypertendu l'est-il par la faute du bruit de son habitat, ou de ses conditions de vie (prises de médicaments, métier pénible et précaire) qui l'empêchent de changer d'habitat ? Serait-il aussi hypertendu en habitant avenue Foch ? Comment le démontrer ? Un autre effet putatif indirect (voire pourquoi pas direct) pourrait résulter des effets auditifs de sons pourtant non audibles par les humains (infrasons, ultrasons), mais capables de perturber le système auditif et celui de l'équilibre. L'évoquer est une chose, le démontrer est autrement plus complexe et fait l'objet d'études scientifiques en cours en France. Enfin, une pollution se définit par une dégradation de l'ensemble d'un environnement, et celle-ci peut n'affecter que certains animaux vivant dans cet environnement. L'être humain peut être épargné, mais pour autant si passereaux et chauve-souris désertent la ville et si les cétacés quittent les abords du littoral où il vit à cause du bruit, sa qualité de vie n'en sera pas moins impactée insidieusement.