ROCHON Michel, *Le cerveau et la musique*, Eyrolles 2024
(180 pages).

Extrait

Chapitre 2 :
Capter les sons de la Terre

Le grand écrivain américain Henry Miller a peut-être raison, l'oreille est un amalgame de cartilage, de ligaments et de muscles bien particulier. C'est surtout une merveille dont le raffinement et la métamorphose au fil des millénaires ont été d'une grande utilité pour nombre d'animaux. Grâce aux ondes sonores qui voyagent dans notre atmosphère, ils peuvent savoir [...] si la rivière où se désaltérer est loin. Pour tous les animaux, dont l'humain, l'oreille et l'audition.

Avant d'être décodées et analysées par le cerveau, les ondes sonores font d'abord leur entrée dans le corps par le pavillon externe de chaque oreille.
En forme d'entonnoir, l'oreille capte certaines fréquences de sons pour ensuite les amplifier avant qu'elles n'arrivent au tympan. Cette amplification n'est pas banale car elle augmente de 10 à 15 décibels de volume des ondes dans la fourchette de sons de notre quotidien. Nos deux oreilles produisent une stéréophonie qui permet de localiser un son dans l'espace avec une assez grande précision. Si vous avez un chien, vous avez certainement remarqué qu'il peut orienter ses oreilles à sa guise et même de façon indépendante l'une de l'autre.

Les Homos sapiens ont perdu cette fonction, bien que certains individus réussissent de petits tours d'adresse en ce sens. La possibilité d'orienter ses oreilles raffine encore davantage l'effet de stéréophonie et de localisation du son dans l'espace. Ce qui se produit une fois le son entré par les oreilles a longtemps été un mystère.

Les origines de l'audition

Très tôt dans l'évolution, la capacité de percevoir les vibrations sonores fait son apparition. Les premières formes de vie dans les océans perçoivent les ondes sonores se déplaçant dans l'eau par le biais de leur structure osseuse. Chez le poisson, un double système auditif est à l'œuvre. Les sons émis à proximité de lui sont perçus par une ligne latérale le long du corps. Un second système auditif plus complexe existe dans une oreille interne située dans les premières vertèbres. Lorsque les animaux ont conquis la terre, ils avaient donc déjà un début de système auditif.
De récentes découvertes du biologiste Christian Christensen, de l'Université Aarhus au Danemark, confirment cette hypothèse. Il a étudié un poisson, le dipneuste africain, qui est le plus proche parent des premiers tétrapodes à avoir fait son apparition sur la terre femm il y a 350 millions d'années. Ce poisson, qui ressemble étrangement à nos anguilles actuelles, n'a pas d'oreilles externes ni d'oreilles moyennes, donc pas de tympans, pour percevoir les différences de pression dans l'air lorsqu'un son est émis. En fait, Christensen a démontré que les basses fréquences agissent directement sur la tête et le cerveau, et que le poisson les détecte sans l'aide d'un système auditif.

Il a également constaté que les salamandres juvéniles, qui sont aquatiques à leur premier stade de vie, détectent les sons dans l'air même si elles n'ont ni oreilles externes ni oreilles internes. Cette découverte est assez extraordinaire, puisque 99,9% de l'énergie sonore est normalement réfléchie par les tissus. C'est donc dire qu'un faible 0,1% de l'onde sonore est perceptible par l'animal.

Cette capacité exceptionnelle permet certainement aux premiers animaux terrestres de survivre aux prédateurs. Graduellement, pendant les 100 millions d'années qui suivent, une oreille moyenne et ensuite une oreille interne se développent, grâce auxquelles le signal sonore traverse l'animal pour être décodé.

Quand les premiers reptiles pondent leurs œufs sur terre, ils passent la majeure partie de leur temps à explorer autour d'eux. Leur capacité à percevoir les vibrations de basse fréquence avec leur corps, identique à celle toujours à l'œuvre

chez les serpents lorsqu'ils rampent sur le sol, puis les autres fréquences, comme pour les lézards et les crocodiles, n'a ensuite pas cessé d'augmenter.

La prochaine grande amélioration apportée par l'évolution pour augmenter l'audition est l'apparition des membres, des pattes. Un des ancêtres du mammifère, le Pristerodon mackayi, voit naître des membres inférieurs de plus en plus présents, ce qui précipite le développement d'une mâchoire complexe favorisant celui des osselets de l'oreille interne afin de mieux percevoir le son. Car la tête n'étant plus à la hauteur du sol, le cerveau ne perçoit plus directement les bruits. Ce sont ces osselets qui transposent le signal sonore du tympan vers la cochlée pour ensuite déclencher un signal électrique vers le cerveau.

L'audition chez les vertébrés

Le développement des structures de l'oreille interne a pu être décrit précisément grâce aux fossiles découverts au cours du dernier siècle. Les squelettes des différents animaux nous montrent comment la sélection naturelle leur a permis d'acquérir une perception plus fine des hautes fréquences.

Tout tourne autour des modifications osseuses.
Elles aboutissent à l'articulation de la mâchoire supérieure et inférieure chez les reptiles, qui va migrer dans l'oreille des mammifères pour devenir le marteau et l'enclume, sans compromettre la capacité de mordre et de mastiquer.

Les vertébrés qui perçoivent ces fréquences ont une plus grande chance de survie, car les prédateurs à l'assaut déplacent des feuilles et des branches, mouvements émettant des sons de hautes fréquences. De plus, les premiers mammifères sont de petits animaux, des insectivores nocturnes. Ces deux éléments combinés privilégient l'évolution d'un système auditif fait sur mesure pour détecter le bruit fin et de haute fréquence causé par le déplacement invisible des insectes.

L'audition chez l'humain

Nos ancêtres lointains évoluent donc à la sortie des eaux, il y a 350 millions d'années, à partir d'une simple perception vibratoire des sons.

L'évolution nous a dotés d'un système auditif pour répondre aux stimuli de notre environnement. Des stimuli qui permettaient à nos ancêtres de trouver leur nourriture et de se protéger des prédateurs. Un vaste programme sonore dont nous pouvons toujours jouir lors d'une longue randonnée en forêt. À la fin de ce livre, nous explorerons le chant des animaux comme moyen de communication et son évolution dans le règne animal.

Aussi, il y a 100000 ans, notre cerveau est déjà bien préparé, sur le plan physiologique, à recevoir et à décoder les nouvelles sonorités de la musique dans tout le spectre des fréquences et des volumes. Des sonorités qui vont progressivement être développées et raffinées par des humains qui croient à la force et au pouvoir des sons organisés, rythmés et chantés pour devenir ce que l'on appelle aujourd'hui la musique.

Et nous voilà équipés d'un appareil d'une grande complexité qui allie de façon remarquable anatomie et physiologie.

Voir l'intérieur de l'oreille

Cependant, ce n'est qu'en 1789 que les travaux d'un homme, l'anatomiste italien Antonio Scarpa, nous éclairent enfin sur la structure interne détaillée de l'oreille chez l'humain. Alliant un grand sens de l'observation à un don de dessinateur, il est le premier à voir et à décrire en détail les structures à l'intérieur de l'oreille et à postuler un mécanisme pour le transfert des ondes sonores du tympan vers des structures internes.

Dans sa ville natale de Pavie en Lombardie, Scarpa a un ami noble qui destine son fils à devenir marquis. Mais le jeune Alfonso Corti est plutôt fasciné par le travail

et les découvertes de l'ami de son père, à un point tel qu'il décide de suivre des études en médecine et devient un scientifique-aristocrate très doué.

Il découvre l'organe de la perception auditive qui porte aujourd'hui son nom, l'organe de Corti. Ce tout petit organe situé dans notre cochlée, comme nous le verrons un peu plus loin dans ce chapitre, sert à transformer le signal sonore en signal électrique, lequel se rend par la suite au cerveau.

L'audition connaît un véritable engouement vers la fin du XIXe siècle, disons entre 1875 et 1900. C'est l'âge d'or de la compréhension, mais surtout de l'utilisation du son pour communiquer, ce qui révolutionne le monde de la musique et de la communication.

À cette période, tout le monde s'intéresse à l'audition. Voici quelques noms célèbres de la fascinante quête scientifique sur l'anatomie du système auditif humain : Alexander Graham Bell, qui invente le téléphone; Thomas Edison, qui met au point le phonographe; et les inventeurs Nikola Tesla et Guglielmo Marconi, qui imaginent la radio. Et voilà, le bal est parti. Ces nouvelles technologies font en sorte que la parole et la musique sont diffusées partout sur la planète et voyagent pour la première fois dans l'espace non pas à la vitesse du son, mais bien à la vitesse de la lumière !

Une différence qui permet à la musique d'être entendue partout dans le monde par le biais des ondes radio. On a tendance à la tenir pour acquise aujourd'hui, mais l'innovation qui consiste à transformer l'onde sonore en onde électromagnétique pour ensuite la retransformer en onde sonore a été capitale. Si l'onde sonore voyage dans l'air à 1224 km/h, l'onde électromagnétique se déplace, elle, à 300000 km/s!

Découvrir la complexité de l'audition

Le physiologiste que je suis ne peut qu'être émerveillé par le travail de plusieurs grands chercheurs lorsqu'il s'agit de comprendre comment l'oreille peut percevoir

et ensuite transformer des ondes sonores en courants électriques dans le cerveau. Le pavillon externe n'est que la porte d'entrée des ondes sonores dans notre corps. Ce qui se déroule ensuite dans l'oreille moyenne et l'oreille interne est phénoménal.

C'est l'un des systèmes les plus complexes qui soient: il transfère les ondes sonores d'abord sur une première membrane, le tympan, qui déplace mécaniquement trois osselets, le marteau, l'enclume et l'étrier. Ce dernier envoie ensuite les ondes sur une autre membrane en forme de colimaçon à l'intérieur de la cochlée. Tout le long de cette membrane, chaque fréquence prend sa place spécifique et meut sous elle les cils qui y sont apposés. Ces cils font partie des cellules ciliées qui sont au nombre de 15000. Un son fait bouger un groupe de cils qui déclenchent des signaux électriques, voyageant du nerf auditif vers le cerveau.

Nous voilà devant une machinerie biologique qui transpose un phénomène physique, l'onde, en signal intelligible pour un organisme vivant: on passe donc d'une onde aux mouvements mécaniques, à l'impulsion électrique et finalement à l'analyse par le cerveau, dans un continuum sans interruption. Rien d'autre dans l'Univers connu n'est aussi sophistiqué.
Les découvertes ayant mené à cette compréhension de la machinerie de l'oreille interne se sont déroulées sur plus d'un siècle.

L'affaire von Helmholtz

L'Allemand Hermann von Helmholtz est à la fois médecin, physiologiste et physicien, ce qui le prédispose à explorer la physique et le fonctionnement de la perception humaine. Philosophe à ses heures, il cultive également une philosophie des sciences autour du lien étroit entre les lois de la nature et les lois de la perception.

Helmholtz est mondialement reconnu pour avoir mis au point d'importantes théories sur la vision et les fondements mathématiques de la perception dans l'œil. Mais il s'attache aussi grandement à la perception des sons et de la musique

qu'il résume dans son livre sur la sensation de la tonalité, publié en 1863. Il écrit aussi une Théorie physiologique de la musique, en 1868, qui bouleverse le monde de l'acoustique et l'acoustique musicale. Par exemple, une mélodie, phénomène extérieur, qui parvient à nos oreilles devient une perception lorsque nous nous en faisons une représentation intérieure.

Mais sans le savoir, Helmholtz déclenche une véritable polémique avec l'invention de son « résonateur ». Cet instrument permet d'identifier toutes les fréquences distinctes contenues dans un son complexe. Avec une combinaison de différents résonateurs, il réussit à reconstituer et à générer artificiellement le son des voyelles, une découverte importante dans la compréhension du langage.

Or, un inventeur canado-écossais s'y intéresse grandement. Et pas n'importe lequel. Alexander Graham Bell, qui ne sait pas lire l'allemand, voit le diagramme du résonateur et pense qu'Helmholtz fait voyager les sons par le fil que l'on voit pendre sur le dessin.

Il croit à tort que c'est un télégraphe capable de transmettre des signaux sonores. Il tente de reproduire ce faux exploit avec une réplique du résonateur d'Helmholtz, mais sans succès. En réalité, le fil en question servait à transmettre le courant électrique nécessaire au fonctionnement du résonateur !

Bell avouera plus tard que, s'il avait appris l'allemand, il aurait peut-être poursuivi la fausse piste d'Helmholtz et non celle de son propre télégraphe qui mena finalement à l'invention du téléphone. Il n'aurait pas commis d'erreur et, qui sait ? Il n'aurait peut-être jamais inventé le téléphone.

Le grand von Békésy

Georg von Békésy est celui qui découvre comment l'audition fonctionne vraiment dans l'oreille interne.

Cela lui vaut le prix Nobel de physiologie ou médecine en 1961. Ce biophysicien hongrois a un parcours assez unique qui ne le prédestinait pas nécessairement à devenir un grand chercheur de l'audition. Il étudie d'abord la chimie et la physique puis s'installe en Scandinavie avant la Seconde Guerre mondiale e cumule des emplois en recherche dans l'industrie privée et dans les universités.

Avant et durant la Seconde Guerre mondiale, Békésy travaille pour les Postes de la Hongrie et débute des recherches sur la qualité des signaux en télécommunication. C'est alors qu'il s'intéresse à l'oreille humaine, car après tout, la qualité d'un signal audio dépend bien de l'état de santé de l'oreille. Après la guerre, il émigre aux États-Unis. Il fait un bref saut à l'Université Harvard pour ensuite terminer sa carrière et sa vie à l'Université d'Hawaii. Si ce biophysicien se passionne pour l'audition, il amasse, au fil des ans, une impressionnante collection d'art asiatique qu'il lègue à la fondation Nobel.

Ce qui fait la clé de son succès, c'est la méthode qu'il utilise pour disséquer les oreilles internes des cadavres humains, afin de conserver intactes les délicates et minuscules cochlées. Avec un procédé de photographie stroboscopique et le dépôt de minuscules flocons d'argent sur la membrane de la cochlée, il peut la voir vibrer selon différentes fréquences sonores. Il constate alors que les sons aigus, donc de hautes fréquences, font surtout vibrer la membrane située à la base de la cochlée, tandis que les sons graves, de basses fréquences, font vibrer la membrane à l'apex de cet organe en forme de colimaçon.

Il conclut donc qu'un son - un bruit, une parole, une musique - se décompose sur la membrane en fonction des fréquences et de leur intensité. La membrane repose sur des milliers de cils faisant partie de cellules sensorielles, les cellules ciliées, qui détectent leur mouvement lorsqu'une fréquence précise les meut. Le mouvement d'un cil en réaction à une fréquence précise amorce un processus dans la cellule sensorielle menant au déclenchement d'un signal électrique qui voyage dans le nerf auditif jusqu'au cerveau.

L'hypothèse de Gold : la cochlée vibre d'elle-même !

Bien que l'on admette que les travaux de von Békésy soient exacts, ils n'expliquent pas tout. Un jeune chercheur du nom de Thomas Gold suggère que la cochlée ne doit pas être un système passif ne faisant que capter un signal pour le transmettre au nerf auditif. De fait, il est bien connu que les musiciens entraînés ont une « oreille» exceptionnelle.

Ils peuvent détecter une fausse note jouée avec une différence de moins de 2% de la fréquence juste attribuée à cette note. Ce biophysicien, qui fait carrière aux universités de Cambridge, de Harvard et de Cornell, avance l'idée que la membrane et les cils de la cochlée agissent comme un détecteur actif de l'onde pour l'amplifier, un peu comme le fait un récepteur radio. De cette manière, les fréquences entrantes s'amplifient et se démarquent du bruit par un signal plus clair et plus fort.

Dans une expérience célèbre, Thomas Gold se sert d'acouphènes pour tester son hypothèse. Près de 10% de la population perçoit ces sons qui peuvent être un bourdonnement, un chuintement ou un sifflement. Les acouphènes ont de multiples causes comprenant des maladies, certains médicaments, un traumatisme sonore, une grande fatigue, un traumatisme crânien.. La liste est longue. L'une des causes les plus fréquentes est le bruit excessif.

Gold enregistre des acouphènes, qu'il déclenche lui-même après avoir exposé des sujets à un bruit excessif, pour démontrer que les cils etla membranes de la cochlée agissent comme un amplificateur sonore réel et suffisamment puissant pour être mesuré. Malheureusement, l'équipement de l'époque (nous sommes en 1948) n'est pas suffisamment sensible pour détecter le son que produit la cochlée.

C'est le physicien d'origine britannique David Kemp qui enregistre finalement ce son en 1978, confirmant l'hypothèse que les cellules ciliés elles-mêmes peuvent faire vibrer la membrane. On parle maintenant de l'otoémission acoustique, ou

«écho de Kemp». L'oreille a donc son propre mécanisme de feedback qui génère une résonance dans le système auditif et rend plus précise la discrimination sonore. Ces émissions sonores sont spontanées ou encore provoquées par un son. On les utilise aujourd'hui pour effectuer un test d'audiologie des personnes souffrant de surdité, surtout des enfants atteints de surdité d'origine génétique, car leurs cellules ciliées ne produisent pas d'écho de Kemp.

Des sons de la terre vers les harmonies de la musique

Lorsque nous écoutons une pièce de musique, les ondes sont transformées en une série fort complexe d'impulsions électriques vers le cerveau. Ce courant électrique se dirige vers plusieurs régions du cerveau pour enclencher une cascade de réactions impliquant le mémoire, les émotions et la cognition.