



TEXTE FONDATEUR

DU

Groupe Perception Sonore

Le groupe perception sonore

Du «Groupe Audition» (GAD) au «Groupe Perception Sonore» (GPS)

INTRODUCTION : Pourquoi le Groupe « Audition » a-t-il souhaité devenir le Groupe « Perception Sonore » ?

Le Groupe Audition (GAD) de la Société Française d'Acoustique (SFA) a pour vocation de représenter les chercheurs français travaillant dans le domaine de la perception des phénomènes sonores. Ce champ de recherches inclut ainsi des disciplines allant de l'acoustique à la psychologie, en passant par le traitement du signal et la physiologie. Historiquement, l'étude de la perception des phénomènes sonores s'est inscrite dans le cadre de la psychoacoustique (mise au point de relations entre les phénomènes décrits par les instruments de la physique et les sensations produites par ces phénomènes sur les êtres humains) et dans celui de l'audiologie (étude de la physiologie de l'oreille, et en particulier des pathologies de l'audition). Le nom de groupe « audition » se trouvait donc décrire de manière satisfaisante ce champ d'activité.

On constate désormais que l'étude de la **perception sonore** est abordée d'une façon considérablement élargie. Trois grandes manières d'aborder ce domaine peuvent être schématisées. D'une part, la perception auditive est étudiée du point de vue de la **psychologie**. Notamment grâce au développement considérable de la psychologie cognitive (qui dans une certaine mesure intègre la psychoacoustique, bien que ce point soit sujet à débats), les chercheurs peuvent à présent inscrire leurs recherches sur la perception sonore à l'intérieur du cadre théorique plus général de l'étude de la cognition. La perception sonore peut également être étudiée du point de vue **physiologique**. Les progrès très importants des neurosciences n'ont pas laissé de côté l'étude de l'audition, et les techniques d'imagerie cérébrale permettent maintenant de s'intéresser aux processus auditifs au niveau même des aires cérébrales. Finalement, cette augmentation et cet approfondissement des connaissances concernant la perception des phénomènes sonores a permis l'émergence de champs de **recherches appliquées** qui utilisent ces connaissances pour la réalisation d'applications sonores. L'étude de la qualité sonore des produits industriels et le design sonore sont en particulier un champ d'étude qui se développe considérablement, tant d'un point de vue académique qu'industriel. Le traitement du signal audio basé sur des modèles perceptifs en est un autre, et le succès d'algorithmes de compression audio basés sur des modèles perceptifs, tels que le mp3 en sont un exemple frappant.

C'est pourquoi le terme de «Groupe Audition» nous apparaît désormais trop limitatif. Afin d'englober toutes ces thématiques, les membres de ce groupe ont souhaité se baptiser du terme plus général de «Groupe Perception Sonore».

Afin de définir et délimiter le champ d'action de ce groupe, ce texte tente de présenter de façon synthétique les trois grandes thématiques citées précédemment (psychologie, physiologie et recherches appliquées).

1. Psychologie de la perception sonore

Le domaine de la perception auditive est traversé par trois grands courants. Il y a d'abord la **psychoacoustique** dont l'objectif est de mettre en relation les propriétés

physiques des stimuli et les sensations qui en découlent (ou attributs auditifs). La **psychologie cognitive** de la perception replace quant à elle la perception dans le cadre plus général de la cognition, c'est-à-dire de la façon dont les êtres humains acquièrent, mémorisent, organisent et traitent les connaissances. Finalement, la **psychologie écologique** s'intéresse à la façon dont les êtres humains perçoivent, de manière directe, leur environnement, et comment la perception permet d'interagir avec cet environnement. On étudie la façon dont la structure des stimuli reflète celle du monde environnant, plutôt que la façon dont le cerveau traite les stimuli. On parle alors d'acoustique écologique qui tente d'identifier, dans les stimuli sonores, les invariants caractéristiques de la source qui produit le son.

La **psychoacoustique** a longtemps été le cadre dominant. Ses apports les plus importants (outre le fait que la psychophysique ait introduit la démarche expérimentale en psychologie) ont été l'établissement de lois et de modèles qui permettent de prédire les propriétés perçues de stimuli (hauteur, sonie, rugosité etc..) à partir des propriétés du signal sonore (fréquence fondamentale, énergie, spectre, etc...). Ces lois empiriques ont par la suite reçu des justifications physiologiques. A l'heure actuelle, au delà de l'énonciation de lois universelles gouvernant la relation stimulation/sensation, la psychoacoustique apporte pleinement sa contribution avec les neurosciences et la physiologie de l'audition à la compréhension des mécanismes neuronaux impliqués dans la production des sensations auditives par l'utilisation de test sensoriels sophistiqués. Les possibilités illimitées de génération de signaux acoustiques numériques permettent de repousser la compréhension de ces mécanismes dans leurs aspects les plus fins en maîtrisant pleinement l'ensemble des paramètres acoustiques. A titre d'exemple, notons que la psychoacoustique, qui a permis de caractériser puis de modéliser l'analyse spectrale réalisée par le système auditif au niveau de la cochlée, travaille actuellement à caractériser l'analyse que peut faire le système auditif des fluctuations temporelles du signal. D'autres travaux tentent de caractériser et modéliser les indices acoustiques pertinents pour la ségrégation perceptive de signaux concurrents simultanés ou séquentiels. Des modèles perceptifs de plus en plus élaborés ont été proposés à l'issue de ces recherches afin de calculer automatiquement certains attributs perceptifs (comme la sonie par exemple). Certaines recherches sur la perception du timbre des sons musicaux ont permis de développer des méthodes multidimensionnelles en psychoacoustique qui ont été transposées avec succès à certains sons quotidiens, avec des applications au design sonore. Ces travaux illustrent la diversité des problématiques et des questions auxquelles la psychoacoustique est aujourd'hui confrontée.

L'approche psychoacoustique rencontre des difficultés quand il s'agit d'étudier la représentation perceptive d'une source sonore, ou tout du moins d'un événement à l'origine d'un son. Cette nouvelle question a ainsi amené certains auteurs à développer d'autres approches de la perception sonore, se concentrant sur ce qui permet de reconnaître la source d'un son. Le cadre théorique devient alors celui de la **psychologie écologique**. Dans ce cadre, il s'agit de comprendre de quelle manière la structure des sons reflète la structure de la source et de l'événement qui les a produits. La psychologie écologique, dans son approche originelle formulée dans les années 60 par Gibson, part de l'hypothèse que notre environnement possède une structure cohérente qui est perçue directement, sans qu'il soit nécessaire de postuler des étapes internes de traitement inférentiel. L'effort pour comprendre comment nous percevons le monde doit donc être porté sur la façon dont la structure des stimuli reflète celle du monde environnant, plutôt que sur la

façon dont le cerveau traite les stimuli. On peut noter que ces réflexions amenées par la psychologie écologique ont conduit certains chercheurs à chercher à établir des relations, non pas entre les propriétés des sons et les sensations perçues par les auditeurs (ce qui correspond à la démarche de la psychoacoustique), mais entre les propriétés mécaniques des événements à la source des sons et les sensations perçues. Un autre courant pense que l'on ne peut pas se passer du signal acoustique dans ce type de recherche. La problématique se décompose alors en trois parties : le problème vibroacoustique (rayonnement acoustique d'une structure vibrante), l'analyse du signal acoustique rayonné, et sa perception. Nous sommes ici dans un domaine plus proche de la psychoacoustique que de la psychologie écologique.

Notons enfin, qu'il y a peu de chercheurs, en France tout du moins, qui se réclamant uniquement et complètement de la psychologie écologique. Néanmoins, l'intérêt de ces théories a été de faire évoluer des recherches qui se concentraient jusque là bien souvent uniquement sur la perception d'un signal sonore isolé, et dépourvu de toute signification, vers une prise en compte du fait que les sons sont quasiment systématiquement et spontanément associés à leur source par les auditeurs (quand l'identification réussit), et que les processus d'identification des sources sonores sont grandement influencés par le contexte d'écoute, les attentes et les connaissances des auditeurs.

La **psychologie cognitive** de la perception s'intéresse à la perception sonore en tant que processus d'acquisition de connaissances. Au centre de la psychologie cognitive se trouve en effet le concept de « représentation mentale ». Il s'agit de représentations symboliques (abstraites), soient issues des stimulations du monde extérieur, soit de la mémoire, sur lesquelles les processus cognitifs agissent (déductions, inférences, décisions, comparaisons, résolutions de problèmes, etc.) Le courant dominant de la psychologie cognitive – l'approche « traitement de l'information » - suppose une organisation fonctionnelle des traitements perceptifs, et propose des modèles de ces traitements inspirés d'une part par les résultats de la neurophysiologie, et d'autre part par les concepts de l'automatique, de l'informatique, et d'une manière plus générale de l'intelligence artificielle : les connaissances sont progressivement extraites et organisées à partir des stimuli, suivant un processus ascendant (les informations sont extraites et sélectionnées) et descendant (les connaissances et les attentes préalables conditionnent le processus d'extraction des informations).

Un autre courant refuse quant à lui la métaphore informatique de la cognition. Dans ce cadre, il est postulé que la structure des représentations mentales est reflétée dans les procédés linguistiques utilisés par les auditeurs pour décrire leur perception. Cette structure est donc beaucoup plus proche de celle d'une langue (réseaux de significations emboîtées, dynamiques, individuelles et variables), que de celle d'un ordinateur. Il s'agit là de recherches qui entretiennent de très forts liens avec la sémiotique (théorie des signes), et la psycho-linguistique. Les notions de contexte, d'ambiguïté et d'apprentissage deviennent alors très importantes. Dès lors, l'utilisation de méthodes verbales permet de mettre en œuvre des travaux expérimentaux qui fournissent des résultats d'une grande richesse descriptive, mais assez difficiles à transposer dans des applications concrètes.

2. Physiologie de la perception sonore

Comme dans tous les domaines de la physiologie, les avancées de la physiologie auditive ont toujours été tributaires de l'apport des concepts physiques et acoustiques d'une part, et des outils de mesure (notamment in vivo) d'autre part, et de la mise en adéquation de ces deux approches. Même si des observations anatomiques anciennes ont pu être assez fines et bien interprétées pour suggérer des pistes non ridicules (Du Verney –1683- par exemple, pensait que le ligament spiral osseux de la cochlée pouvait servir de résonateur avec des propriétés fréquentielles graduées de la base à l'apex, ancêtres de la tonotopie), il a fallu attendre Hermann von Helmholtz pour voir la construction d'une véritable théorie physique de l'analyse des fréquences par le système auditif : cette théorie a fourni, du reste, le premier pont entre la physiologie et la psychoacoustique, seule accessible à l'expérience à cette époque.

L'étape suivante a été la clarification de l'anatomie très complexe de l'oreille interne, couronnée par la description méticuleuse de l'organe de Corti, mais ce dernier restait toujours inaccessible aux mesures, l'amplitude de ses déplacements étant de plusieurs ordres de grandeur inférieure au micromètre pour la plupart des situations acoustiques pertinentes. Combinant cette fois les approches conceptuelle et expérimentale, Georg von Békésy, initialement spécialiste de la physique des phénomènes propagatifs électromagnétiques, a consacré l'essentiel de sa carrière, à partir des années 1930, à visualiser (par stroboscopie) et à mesurer les réponses de la membrane basilaire à des sons de très fort niveau, 120 à 140 dB SPL ou plus (soit sur animaux réels, soit sur modèles agrandis). Par des considérations d'échelle, il transposait ensuite les résultats pour décrire les réponses vibratoires de la cochlée de mammifère en réponse à des sons ordinaires. Son œuvre lui a valu le prix Nobel de médecine 1961, pour la description de l'onde propagée cochléaire, mode particulier de réponse de la membrane basilaire. L'onde propagée est issue de la base et progresse lentement, par couplages longitudinaux, le long de la membrane basilaire, par opposition aux ondes de compression qui avancent à la vitesse du son dans les liquides cochléaires, pour ensuite déclencher des résonances locales à la manière d'Helmholtz.

Comme aime à le rappeler Rémy Pujol, dans l'esprit des scientifiques extérieurs au monde de l'acoustique, ce prix Nobel signifie que le problème de la perception sonore a été définitivement et complètement résolu dès 1961... Le groupe perception sonore de la SFA ne serait-il alors qu'un club de vieux nostalgiques qui feignent d'ignorer que la recherche de pointe a quitté depuis longtemps leur domaine ? C'est oublier que vibrer n'est pas percevoir, et que même en ce qui concerne les vibrations, le jeune physicien Thomas Gold, dès 1948, avait contesté la théorie de Békésy et proposé une théorie alternative révolutionnaire, basée sur l'amplification des ondes acoustiques par des éléments cochléaires capables d'exercer un rétro-contrôle de la résonance. Faute de preuves expérimentales, la théorie de Gold a été oubliée pendant 30 ans, puis remise au premier plan par cinq séries d'observations :

-la psychoacoustique décrit des performances (sélectivité, discrimination, etc) bien plus fines que celles prédites et observées par Békésy ;

-la neuroanatomie distingue dans la cochlée des cellules sensorielles (les cellules ciliées externes ou CCE) qui ne sont que très peu reliées aux fibres nerveuses afférentes du nerf cochléaire ;

-la cochlée émet des sons, les otoémissions acoustiques qui ne peuvent provenir que d'éléments résonnants beaucoup plus fins que ceux observés par Békésy ;

-les vibrations cochléaires, mesurées par effet Mossbauer puis par méthodes optiques de plus en plus sophistiquées, montrent des résonances 1000 fois plus amples que celles de Békésy et extrêmement fines, aussi fines que celles trouvées par les physiologistes du nerf auditif et des noyaux centraux ;

-enfin, les cellules ciliées externes des cochlées de mammifères sont mécaniquement actives : elles sont l'élément actif de la théorie de Gold. Chez les non mammifères existent des éléments qui jouent un rôle similaire.

Si on y ajoute le fait que les CCE reçoivent un fort contingent d'innervation efférente qui les rend contrôlables centralement, on voit émerger un paysage, celui des années 1980-90 pendant lesquelles on redécouvre une analyse sonore extrêmement sophistiquée dès la périphérie dans les cochlées normales, et a contrario très dégradée dans les cochlées sourdes. Cette révolution post-Békésy a été l'occasion pour la SFA et son groupe audition, particulièrement grâce à l'énergie de la psychoacousticienne Marie- Claire Botte, de lancer la publication d'ouvrages de référence, le premier de la série (SFA / INSERM / Lavoisier) portant sur la biomécanique de l'oreille, les résonances et l'électrophysiologie cochléaires, tandis que le deuxième rappelait les bases modernes de la psychoacoustique et le troisième la physiologie des voies auditives centrales.

Quelles sont désormais les problématiques des années 2000 dans le domaine de la physiologie de la perception auditive ? Elles sont beaucoup plus riches et ouvertes que celles des années 60, beaucoup plus multidisciplinaires également. Pour la cochlée tout d'abord, les molécules spécifiques impliquées dans les mécanismes de filtrage et d'amplification cochléaire, mais aussi dans la transduction mécano-électrique et dans la régulation synaptique sont en cours d'identification. Les processus de développement et de réparation font l'objet de recherches intensives dans l'espoir d'aboutir à la régénération des cellules sensorielles endommagées (par exemple, à la suite d'expositions au bruit ou à des substances ototoxiques). L'acoustique n'est pas exclue de ces investigations issues de la génétique, de la physiologie moléculaire et de la pharmacologie, puisqu'elle est indispensable pour élucider le fonctionnement de la cochlée en cas de déficit de telle ou telle molécule.

Au niveau central, les mécanismes du traitement de l'information acoustique sont de plus en plus accessibles à l'expérimentation, notamment grâce à l'avènement de techniques d'enregistrement neuronal multi-électrodes et de l'imagerie cérébrale fonctionnelle, pour ne citer que les nouvelles approches les plus spectaculaires. Les synergies entre physiologie et psychoacoustique sont évidentes dans ce domaine.

Il existe donc des liens renforcés entre l'acoustique, la physiologie, la psychoacoustique, les neurosciences et la médecine, liens imposés par la complexité des investigations requises mais qui ne vont pas de soi : le rôle d'une société savante comme la SFA est de rendre accessible aux étudiants et aux chercheurs confirmés d'une discipline les informations et techniques issues des autres disciplines, et c'est plus que jamais un challenge exigeant.

3. Perception sonore et applications

3.1. Design sonore

Pendant longtemps le son d'un produit ou d'un objet était considéré comme quelque chose de gênant, voire d'inutile. Encore de nos jours, peu de réflexions en amont s'inscrivent dans la conception d'un produit industriel au niveau de sa " signature " sonore. Les objets de notre environnement se retrouvent donc parfois amputés de leurs résonances propres pour être équipés au plus rapide d'un " buzzer " aux sonorités immatérielles créant un environnement sonore sans cohérence et sans signification. Afin de concevoir un produit de qualité, il est nécessaire de penser le matériel sonore en termes de production esthétique adaptée à sa fonction. Il est nécessaire également de considérer un fonctionnalisme sonore qui n'est pas défini uniquement par la recherche d'une forme adaptée à la fonction de l'objet concerné, mais aussi par l'usage de cet objet, et par son contexte d'utilisation. Les formes sonores ne sont plus considérées comme issues de recherches esthétiques pures mais orientées par les recherches menées en perception, allant de la psychoacoustique à la psychologie cognitive, et par des phases de validations expérimentales, en laboratoire et en situation. L'approche globale de la perception du phénomène sonore permet de caractériser perceptivement une source sonore et ainsi de définir des critères objectifs de la qualité sonore d'un produit. Ces critères contribuent de façon significative à l'image auditive projetée par le produit et sont des informations qui soulignent son identité et sa fonctionnalité mais aussi les aspects ergonomiques et esthétiques du produit. Ces critères perceptifs sont fortement liés aux propriétés acoustiques et mécaniques de l'objet sonore. Il est donc souhaitable de déterminer les relations entre ces différents domaines; mécanique, acoustique et perception, afin de contrôler et d'ajuster les paramètres, et ainsi, produire un son utile, identifiable et agréable. On parle respectivement de fonction, d'identité et de qualité sonores; trois axes qui structurent le nouveau champ de recherche du design sonore et qui se retrouvent dans des domaines d'applications comme le produit, l'espace, la signalétique et les médias.

3.2. Traitement du signal basé sur la perception

L'étude de la perception des phénomènes sonores a produit des modèles des traitements effectués par le système perceptif humain. Les applications audio, qui nécessitent des outils de traitement de signal toujours plus perfectionnés se sont bien vite emparées de ces modèles, qui leur ont permis de mettre au point des techniques inspirées par la perception humaine. Un exemple basique est l'utilisation d'une échelle fréquentielle non-linéaire inspirée par le fonctionnement de la membrane basilaire. Dès la fin des années 1930, Stevens propose ainsi l'échelle des mels qui est toujours couramment utilisée par certaines techniques telles que coefficients cepstraux en échelle de mel (MFCC). Naturellement, une des applications les plus fertiles est la compression audio. Il existe toute une gamme d'algorithmes de compression audio qui sont basés sur des modèles perceptifs. L'idée de base est de ne coder en priorité dans un signal audio que ce que les

auditeurs sont réellement capables de percevoir. L'exemple le plus parlant est celui de la norme de compression MPEG-1 layer 3, basée sur un modèle de masquage auditif.

Une autre catégorie d'applications faisant usage de traitements des signaux inspirés par les modèles perceptifs est celle qui englobe l'analyse et la reconnaissance automatique de scènes sonores (computer auditory scene analysis/recognition). Il s'agit dans ce cas de s'inspirer de la manière dont les êtres humains vont segmenter le champ acoustique qui parvient à leurs oreilles en source et en événements distincts et identifiés pour créer des algorithmes effectuant la même tâche de manière automatique. Les applications de ces algorithmes sont nombreuses. La manière dont les auditeurs identifient les sources sonores a également conduit les chercheurs de ce domaine à travailler sur la notion de similarité perceptive, dont les applications sont la classification automatique de bases de données sonores et la recherche d'information dans ces mêmes bases de données (music information retrieval).

Finalement, les modèles perceptifs d'audition sont adaptés dans le cadre de la réalité virtuelle (simulations architecturales, jeux vidéo, etc.) pour permettre la simulation d'environnements complexes (i.e. comportant un très grand nombre de sources). Un des buts des simulations est de restituer la position spatiale des sources sonores, on s'appuie pour cela sur les connaissances issues des recherches en localisation auditive. Les applications utilisent des modèles de sonie, de masquage, d'analyses de scènes sonores, etc.

3.3. Applications cliniques

Le dernier grand champ d'application issu de l'étude de la perception des phénomènes sonores est le développement et l'amélioration d'aides auditives adaptées à chaque pathologie auditive. Grâce aux évolutions des connaissances fondamentales et des méthodes d'exploration fonctionnelle, l'audiologie, qui vise à quantifier et comprendre l'audition pathologique pour mieux la réhabiliter, et la technologie des appareillages auditifs (électroacoustiques – prothèses "classiques" –, électriques – implants – ou désormais mixtes – implants + prothèses, stimulation mécanique de l'oreille moyenne) prennent un nouveau départ avec de réelles perspectives d'aboutir à de meilleurs résultats pour les sujets malentendants voire sourds. L'aide auditive conventionnelle vise simplement à apporter une amplification non linéaire de façon adaptative en fréquence et en amplitude au signal sonore pour compenser une perte auditive neurosensorielle. L'implant du tronc cérébral stimule quant à lui électriquement les noyaux cochléaires au moyen d'une électrode implantée par chirurgie. Entre ces deux extrêmes, on trouve les prothèses de l'oreille moyenne et les implants cochléaires. Toutes ces technologies s'appuient sur une masse considérable de travaux en physiologie mais également en psychoacoustique qui ont permis de déterminer puis d'affiner les techniques et algorithmes de stimulation.

L'étude de la perception des phénomènes sonores permet également de développer des tests audiologiques élaborés afin de caractériser des déficits particuliers. Citons ici le TEN-test développé par Brian Moore qui permet aujourd'hui de mettre en

évidence des régions cochléaires « mortes » dans lesquels les cellules ciliées internes sont altérées. D'autres tests issus de l'étude de la perception des phénomènes sonores pourront également être élaborés afin de prédire la réussite d'un éventuel appareillage. Ces tests pourront à l'avenir éclairer le choix du prescripteur et du patient.

Pour terminer, il faut également mentionner ici les possibilités de réhabilitation auditive offertes par le développement d'entraînements spécifiques. Des études en psychoacoustique et en neurosciences utilisant des techniques de potentiels évoqués auditifs ont mis en évidence les fortes capacités plastiques du système auditif central. Il a également été mis en évidence que la pose d'un implant cochléaire déclenchait des modifications dans le système auditif. Cette plasticité remarquable du système auditif offre ainsi des perspectives intéressantes en clinique. Notons que des entraînements auditifs sont déjà pratiqués pour compenser certaines formes de dyslexie et qu'il semble donc réaliste d'envisager de développer de nouveaux types d'entraînements. Par exemple, la notion désormais bien documentée de plasticité des centres auditifs incite à envisager un appareillage le plus rapidement possible en cas de déficit.

Conclusion

Cette brève description ne se veut en rien exhaustive. Elle a simplement pour but de souligner la diversité et la complémentarité des domaines de recherche regroupés sous la thématique « Perception Sonore », et délimitant le champ d'action du GPS. Nous avons volontairement exclu toute référence bibliographique dans ce texte, et renvoyons le lecteur intéressé à notre base bibliographique, que nous avons tenté de garder aussi exhaustive que possible. Pour finir, les membres du GPS tiennent à remercier Paul Avan pour avoir contribué à l'élaboration de ce texte.