

La psychoacoustique : science de l'audition, science du son

Georges Canévet,

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (UPR CNRS 7051)
31 chemin Joseph-Aiguier
13402 Marseille CEDEX 20
E-mail : Canevet@lma.cnrs-mrs.fr

Laurent Demany

Laboratoire de Neurophysiologie (UMR CNRS 5543)
Université Victor Segalen
146, rue Léo-Saignat
33076 Bordeaux
E-mail : laurent.demany@psyc.u-bordeaux2.fr

Nicolas Grimault

Laboratoire de Neurosciences et Systèmes Sensoriels (UMR CNRS 5020)
50, avenue Tony Garnier
69366 Lyon CEDEX 07
E-mail : nicolas.grimault@olfac.univ-lyon1.fr

Stephen McAdams

Centre Interdisciplinaire de Recherche sur la Musique,
les Médias et la Technologie (CIRMMT)
Faculté de Musique
Université McGill
555 rue Sherbrooke ouest
Montréal, Québec
Canada H3Q 1E3
E-mail : smc@music.mcgill.ca

Daniel Pressnitzer

Laboratoire de Psychologie Expérimentale (UMR CNRS 8581)
et Département d'Études Cognitives
École Normale Supérieure
29, rue d'Ulm
75230 Paris CEDEX 05
E-mail : Daniel.Pressnitzer@ens.fr

Cet article offre un tour d'horizon non exhaustif des tendances actuelles de la recherche en psychoacoustique, notamment en France. La première moitié présente les thèmes de recherche centrés essentiellement sur l'analyse des fonctions auditives, de la périphérie au cortex, l'analyse des scènes auditives, la mémoire auditive et les méthodes d'exploration des structures perceptives en audition. La seconde moitié décrit plutôt des recherches orientées signal. On y aborde les problèmes de simulation par écouteurs de l'espace sonore, de métrologie sonore, de contrôle actif du bruit et on présente la spécialité récente de la psychomécanique, qui allie la vibroacoustique et la psychoacoustique. Chaque section du texte ci-dessous est consacrée à un thème particulier. Elle a été rédigée par l'un des auteurs de l'article, elle reflète donc en partie les activités propres du laboratoire correspondant.

This article provides a non-exhaustive overview of current trends in psychoacoustics research, particularly in France. The first half presents the research themes centered primarily on the analysis of auditory function from periphery to cortex, auditory scene analysis, auditory memory, and methods for exploring perceptual structures in hearing. The second half describes research oriented more toward signals. The areas dealt with include the problems of simulating sound space with headphones, perceptually relevant sound measurement, active noise control, and the recent specialisation of psychomechanics that combines vibroacoustics and psychoacoustics. Each section of the following text is dedicated to a particular theme and was written by one of the coauthors of the article. It therefore reflects in part the specific activities of the corresponding laboratories.



l'origine, la psychoacoustique était une science de l'audition. Créée pour l'étude des relations entre stimuli sonores et réponses auditives induites, elle a surtout permis de progresser dans la connaissance du fonctionnement du système auditif et dans sa modélisation. Le signal ne servait alors que d'outil.

Avec le progrès des techniques de traitement du signal, la psychoacoustique est aussi devenue une science des sons. Dans ce cas, elle est utilisée pour l'étude de propriétés particulières du son, propriétés que l'on appelle souvent «attributs subjectifs» ; c'est alors le système auditif qui sert d'outil pour l'analyse du son, et non plus l'inverse.

Qu'elles portent sur l'audition ou sur le son, les activités scientifiques liées à la psychoacoustique se répartissent

assez équitablement entre recherche fondamentale et applications. La recherche fondamentale poursuit et affine la description des mécanismes de la perception auditive et de l'impact perceptif des sons. Les applications touchent tous les domaines où l'auditeur est le principal destinataire de l'effort de recherche (audiologie, aides auditives, environnement, communications, design sonore, qualité acoustique des produits manufacturés...).

Dans le présent article, nous procédons à un tour d'horizon des tendances actuelles de recherche en psychoacoustique, notamment en France. Chaque section de l'article, consacrée à un thème particulier, a été rédigée par l'un des auteurs ; elle reflète donc en partie la spécialité et les activités propres du laboratoire correspondant. Une bibliographie sélectionnée permet de plus aux lecteurs intéressés d'approfondir les questions de leurs choix.

Perception auditive et physiologie

Pour entendre un son, reconnaître sa source, l'évaluer en fonction de son contexte, voire l'apprécier, les vibrations acoustiques qui parviennent à nos oreilles doivent être converties en activité cérébrale. Une partie des études de psychoacoustique consacrées à l'audition traite donc des fonctions auditives qui s'établissent le long des circuits neuronaux, de la périphérie au cortex. Leurs auteurs sont amenés à conduire leurs recherches en coopération ou en parallèle avec les spécialistes de la physiologie auditive.

Ces études psychoacoustiques font partie d'une approche intégrative de l'audition, dans laquelle la psychologie expérimentale caractérise les percepts des auditeurs et la physiologie recherche des mécanismes sous-jacents [1]. Les modèles informatiques sont aussi utilisés pour relier ces deux facettes de la recherche. L'intérêt de l'approche intégrative apparaît quand on considère que le moindre aspect de notre perception des sons peut faire l'objet d'un très grand nombre d'études psychophysiques, si l'on veut caractériser l'influence de tous les paramètres acoustiques et de leurs interactions sur l'expérience de l'auditeur. En étudiant les mécanismes sous-jacents, on espère pouvoir proposer des théories unifiant l'explication des résultats perceptifs, et des modèles permettant des prédictions et des applications pratiques.

La transduction des vibrations acoustiques en activité dans le nerf auditif est réalisée dans la cochlée. Cet encodage initial façonne les indices perceptifs disponibles. Son étude et sa modélisation permettent par exemple de mieux comprendre la perception de la parole chez le normo-entendant et chez le mal-entendant, en vue de proposer des stratégies pour les prothèses auditives [2]. Des possibles applications cliniques de diagnostic sont aussi recherchées dans l'étude des fortes composantes non linéaires de la mécanique cochléaire [3].

Une des particularités du système auditif est que les sons recrutent un grand nombre de relais sous-corticaux avant d'atteindre le cortex. Ces relais modifient profondément l'information transmise, et ils peuvent être vus comme autant de centres de «traitement de signal neuronal» qui restent à caractériser. Certains, comme le système olivo-cochléaire, sont impliqués dans des voies de traitement descendantes [4]. L'activité de centres comme le noyau cochléaire peut révéler des corrélats de capacités perceptives aussi fondamentales que la détection d'un signal au sein d'un bruit de fond complexe [5].

Les zones corticales auditives font l'objet d'études utilisant une large panoplie de techniques. L'enregistrement de l'activité de neurones individuels a montré la grande plasticité du système thalamo-cortical [6] ce qui a des conséquences pour les problématiques liées à l'apprentissage [7]. Les zones traitant d'indices acoustiques particuliers, comme la modulation d'amplitude, sont localisées et caractérisées avec l'imagerie fonctionnelle par résonance magnétique [8] ou la stéréo-encéphalographie [9]. Enfin, des processus plus abstraits comme la formation d'objets perceptifs [10] ou l'établissement de continuité perceptive [11] ont été étudiés avec l'électro- et la magnétoencéphalographie.

Une des richesses des recherches actuelles en psychoacoustique est donc que la psychologie expérimentale, les neurosciences et la modélisation se combinent tout naturellement, et à plusieurs niveaux d'analyse : pour étudier des attributs perceptifs élémentaires, comme la hauteur [12] ou les fluctuations d'enveloppe d'amplitude [13] ; pour proposer des mécanismes généraux d'organisation auditive [5 ; 11] ; pour contribuer à notre compréhension des signaux complexes, comme la parole ou la musique [14 ; 15].

Analyse des scènes auditives

Dans la plupart des situations naturelles d'écoute, un ensemble de sons, constituant une «scène auditive», parvient simultanément ou successivement à notre oreille. Face à de telles situations, le système auditif parvient très bien à isoler et à identifier les différentes sources présentes dans l'environnement sonore : le système auditif analyse la scène auditive. Pour réaliser cette analyse, le système auditif se base sur les caractéristiques acoustiques communes aux signaux issus d'une même source sonore. On pourra consulter l'ouvrage de Bregman (1990) [16] pour un exposé détaillé de ce sujet. Notons que l'analyse d'une scène auditive ne consiste pas uniquement à séparer des objets sonores mais également à regrouper les événements sonores issus de la même source, qu'ils soient présents simultanément ou qu'ils se succèdent dans le temps. Ainsi, un ensemble de phonèmes prononcés par un locuteur formera pour le système auditif ce qu'il est d'usage d'appeler un flux auditif. Pour regrouper dans un même flux auditif ou attribuer des flux auditifs distincts à des événements sonores qui, se succédant, forment des séquences temporelles, le système auditif s'appuie sur des similitudes ou sur des différences acoustiques (hauteur, timbre, propriétés temporelles...) existantes et perceptibles.

La compréhension de ces mécanismes est un enjeu majeur de la psychoacoustique qui, sur le plan fondamental, peine encore à expliquer la perception auditive en milieu bruité. Une meilleure connaissance de ces mécanismes pourrait sans doute permettre de mieux comprendre, à défaut de résoudre, les difficultés spécifiques des personnes malentendantes dans ces situations, qu'elles soient équipées ou non d'une prothèse auditive. Une plainte récurrente des malentendants consiste en effet à regretter leur gêne considérable en milieu bruité et l'efficacité limitée de leur aide auditive dans ces situations. La complexité et notre large incompréhension de ces mécanismes contribuent par ailleurs à l'échec des logiciels de reconnaissance vocale automatique en présence de bruit ou de voix concurrentes. Une stratégie parmi d'autres utilisée par certains de ces logiciels consiste en effet à «mimer» le fonctionnement du système auditif.

Sur le plan fondamental, la communauté psychoacoustique française a très fortement contribué aux connaissances actuelles des mécanismes perceptifs liés à l'analyse des scènes auditives sous tous ses aspects. Ainsi, des travaux extrêmement variés issus de laboratoires français ont porté sur la séparation de sources simultanées [17] ou non simultanées [18]. De nombreux travaux ont contribué

à mettre en évidence le rôle de l'attention [19 ; 20] et des connaissances [21] pour cette analyse. Des travaux ont permis de tester le rôle particulier d'indices acoustiques présents dans notre environnement comme la hauteur [22], les modulations de fréquence [23], ou d'amplitude [24]... Enfin, des travaux sont actuellement en cours pour caractériser les conséquences d'une perte auditive pour cette analyse et déterminer ainsi les indices acoustiques pertinents pour ces personnes malentendantes pour extraire une information d'une mixture sonore [25].

Notons également pour conclure que ce champ d'investigation a un impact considérable et multiple sur la perception auditive, ce qui explique sans doute l'engouement de la communauté scientifique française et internationale à ce sujet. Il apparaît en effet très clairement aujourd'hui que les mécanismes de l'analyse des scènes auditives interagissent très fortement avec les autres mécanismes perceptifs. Ainsi, les attributs perceptifs d'un son : sa hauteur, sa sonie, son timbre... sont tributaires du fait que ce son ait été perceptivement isolé et perçu comme une entité sonore. Les mécanismes de l'analyse des scènes auditives semblent donc être un préalable conditionnant la perception et sont à ce titre très souvent évoqués dans la littérature scientifique spécialisée en psychoacoustique.

La mémoire auditive

On peut distinguer trois formes de mémoire sensorielle, dans le domaine auditif comme dans le domaine visuel. Il existe d'abord une mémoire à très court terme, dont l'empan se mesure en dixièmes ou centièmes de seconde. Celle-ci est en réalité une composante de la perception elle-même, de sorte qu'on la qualifie parfois de « pré-perceptive » : tout objet auditif étant étendu dans le temps (même un clic, après le filtrage cochléaire), n'importe quelle « perception » auditive fait intervenir une intégration temporelle et donc une mémoire. Dans le cas d'un signal bref, la perception d'un attribut simple tel que la hauteur ou la sonie est un processus qui peut se prolonger très au-delà de la fin du signal. Il apparaît que la durée requise pour une perception optimale de hauteur tonale dépend de l'incertitude du signal [26].

Une seconde forme de mémoire auditive, dite « à court terme », a un empan de plusieurs secondes. De ce point de vue, elle s'apparente à ce que les psychologues cognitivistes appellent la « mémoire de travail », forme de mémoire qui porte sur du matériel symbolique tel que des mots ou des nombres. Cependant, alors que la rétention à court terme d'un objet tel qu'un numéro de téléphone fait cruciallement intervenir l'attention et bénéficie grandement d'une autorépétition mentale, la mémoire à court terme strictement auditive (non symbolique) semble être très largement automatique et insensible à l'attention. La constitution d'une trace mnésique de hauteur tonale est légèrement dépendante de l'attention [27], mais une fois la trace constituée sa rétention n'apparaît plus du tout dépendre de l'activité mentale du sujet. Tel est le cas, du moins, pour la rétention d'un son non suivi d'autres sons [28]. Dans ce cas, une trace de hauteur tonale se dégrade au cours du temps moins vite qu'une trace de sonie [29] ;

son déclin dépend de processus qui restent à élucider, un modèle simple inspiré de la théorie de la détection du signal s'avérant insatisfaisant [30]. La rétention d'une trace de hauteur tonale est automatique au point que l'on peut même retenir plusieurs secondes une hauteur tonale qui n'a pas été perçue consciemment. Il est en effet possible de percevoir correctement la direction d'un changement de hauteur entre deux sons purs A et B, distants de plus d'une seconde, alors que le son A a été soumis à un « masquage informationnel » empêchant sa reconnaissance [31]. Le mécanisme sur lequel repose cette surprenante détection automatique de changement est susceptible de jouer un rôle important dans l'analyse des scènes auditives. Toutefois, la rétention à court terme de la hauteur tonale d'un son suivi d'autres sons, de même que la rétention de séquences mélodiques, semble reposer sur l'existence de traces mnésiques représentant la hauteur indépendamment du timbre ou de la sonie [33].

Il existe enfin une mémoire strictement auditive à long terme (à peu près permanente). Comment pourrait-on, en l'absence d'une telle mémoire, identifier entre autres des sons de parole ? Elle se manifeste également par l'existence d'apprentissages discriminatifs, observables à tout âge de la vie. Un entraînement à détecter, par exemple, de petites différences de fréquence par rapport à une fréquence fixe produit typiquement un progrès net et durable des performances (une réduction du « seuil différentiel »). À Bordeaux [7] de même qu'à Lyon [33], des études ont été menées sur les apprentissages de ce type. Une hypothèse plausible est qu'ils reposent au moins en partie sur des modifications du système auditif lui-même, au niveau du cortex cérébral.

Méthodes d'exploration des structures perceptives en audition

Un objectif important de la psychoacoustique est aussi de déterminer la structure des représentations perceptives d'événements acoustiques produits dans notre environnement. La forme de ces représentations conditionne la perception des attributs tels que le timbre, la hauteur, la sonie et la position spatiale, ainsi que la reconnaissance et la compréhension des événements dans leur contexte. Parfois on connaît certaines dimensions de ces représentations à l'avance, comme la hauteur tonale et la sonie, et on peut demander aux auditeurs de se focaliser dessus et concevoir des tâches appropriées pour sonder la représentation.

Mais d'autres attributs sont plus complexes et on n'a pas nécessairement les mots qui indiqueraient sur quel aspect du son il faut se focaliser, ni parfois quels sont les aspects que les auditeurs pourraient percevoir. C'est le cas du timbre musical et des dimensions perceptives qui sous-tendent la reconnaissance des propriétés de sources sonores (telles les matériaux dont elles sont constituées). Dans bien des cas, on peut utiliser les techniques exploratoires qui permettent de découvrir la structure perceptive sans avoir d'a priori sur ses dimensions ou composants. Différentes tâches et techniques d'analyse de données s'offrent au chercheur dans cette approche.

Pour identifier les dimensions perceptives mentionnées ci-dessus, l'une des procédures fréquemment utilisées consiste à présenter toutes les paires de sons du corpus étudié aux auditeurs, puis à leur demander de juger le degré de ressemblance ou de dissemblance des membres de ces paires. On utilise à cette fin une échelle numérique ou analogique (p. ex. avec un curseur sur une échelle continue entre «très dissemblables» et «très similaires»).

En faisant la comparaison entre toutes les paires on obtient une matrice de dissemblance qui peut être analysée par un algorithme d'analyse multidimensionnelle de proximités (voir McAdams, [34] pour une revue de question à ce sujet). Cette analyse ajuste les données perceptives à un modèle mathématique de distance qui situe chaque son dans un espace où les sons jugés comme similaires sont proches et les sons jugés comme dissemblables sont éloignés dans l'espace. Ensuite on essaie d'interpréter les coordonnées des sons le long de chaque dimension en termes de paramètres acoustiques dérivables du signal sonore. Le modèle mathématique (appelé «espace des timbres») devient donc une formalisation de la représentation perceptive qui a servi à l'auditeur pour comparer les événements et la corrélation avec les paramètres du signal permet de comprendre son origine acoustique.

Cette technique a été l'approche principale pour l'étude du timbre musical [35 ; 36 ; 37 ; 38], mais sert également à prédire les effets du timbre dans l'organisation de flux auditifs [39 ; 40] et même la perception des intervalles de timbre et leurs transpositions [41 ; 42]. En outre, cette approche a permis de déterminer les attributs auditifs qui correspondent à différents paramètres mécaniques des sources sonores, comme la densité et l'élasticité [43], la géométrie [44] et les propriétés des matériaux comme les amortissements internes [45;43]. Des variantes de l'approche multidimensionnelle ont également servi dans l'étude des paramètres acoustiques qui contribuent à la qualité sonore des véhicules et des bruits de circulation [46], des ventilateurs-convecteurs [47] et des avertisseurs sonores [48].

Perception et simulation de l'espace sonore subjectif

On a longtemps pensé que la perception auditive spatiale se construisait à partir du seul champ acoustique présent sur les tympans. Les informations véhiculées par les caractéristiques temporelles et fréquentielles particulières du signal sont mises à profit pour établir une sorte de carte neurale des sources sonores ; l'auditeur apprend à utiliser cette carte pour situer les sources dans l'environnement. Mais cette construction purement auditive peut être fortement influencée par un certain nombre d'autres structures ou fonctions, pas nécessairement auditives. L'effet le mieux connu est celui de la vision, dont on sait que les voies nerveuses interagissent avec celles de l'audition. De plus, on a repéré l'intervention de mécanismes cognitifs très discrets et très fins, par exemple dans l'établissement de l'effet d'antériorité [49] ; cet effet, souvent appelé «effet de Haas», régit la direction apparente d'un son en présence d'échos, donc la localisation dans une salle.

Cette complexité retarde les progrès de la simulation de l'espace sonore subjectif, notamment par écouteurs. Une telle simulation est pourtant bien utile dans la réalisation d'environnements virtuels. La question fait d'ailleurs l'objet de recherches poussées dans plusieurs laboratoires, notamment ceux de France Télécom à Lannion (voir par exemple [50], ou [51]). Les recherches actuelles se concentrent entre autres sur la détermination de ce que l'on appelle les «fonctions de transfert reliées à la tête» (et plus fréquemment les HRTF, sigle de langue anglaise). En effet, pour reproduire par écouteurs une impression d'écoute en extérieur, il suffit en principe d'alimenter ces écouteurs par un signal judicieusement filtré, de telle sorte que le champ produit sur les tympans de l'auditeur soit le même que celui que produirait une source réelle. Le filtrage en question doit transformer le signal électrique d'une manière analogue aux effets de diffraction et d'absorption par le corps qui transforment le signal acoustique. La mesure de cette transformation acoustique permet de déterminer les fonctions de transfert indiquées ci-dessus, et donc le filtrage à effet équivalent [52]. Mais cette mesure soulève de très grandes difficultés. D'abord, les HRTF individuelles diffèrent toutes les unes des autres ; elles sont une empreinte auditive très personnelle et il faut donc effectuer la mesure pour chaque auditeur intéressé. De plus, la mesure nécessite un équipement rare et coûteux (notamment une chambre sans écho), elle est longue et pénible pour le sujet, surtout lorsqu'il s'agit de la réaliser sur des enfants [53]. Les recherches s'orientent donc maintenant dans deux directions qui contournent la difficulté : la détermination par calcul (donc simulée) de HRTF individuelles, et l'entraînement à la localisation sur des indices erronés, en exploitant la plasticité du système auditif c'est-à-dire l'adaptation des facultés de localisation.

Le calcul de HRTF individualisées, effectué à partir d'un nombre limité de mesures, est à l'étude chez les spécialistes cités plus haut de France Télécom. Il est basé sur un principe d'apprentissage statistique. Partant d'un échantillon de HRTF représentatives de l'individu, chacune correspondant à une direction sélectionnée, on détermine toutes les autres fonctions en utilisant les services d'un réseau de neurones préalablement entraîné. À titre d'exemple, un ensemble complet de HRTF peut être obtenu à partir de seulement 50 fonctions effectivement mesurées. On peut aussi calculer des HRTF à la manière de Fels et al. (2004) [53]. Ces auteurs procèdent d'abord à une «photogrammétrie» de l'individu, permettant d'établir un modèle assez précis de la tête et des épaules. Un logiciel de dessin permet ensuite la numérisation des données géométriques correspondantes. Enfin, le champ acoustique que produirait une source à l'infini est calculé (approximativement) en utilisant une méthode d'éléments finis de frontière. On en déduit la fonction de transfert entre le champ libre et les oreilles.

Mais un auditeur peut encore localiser assez correctement une source alors que les informations directionnelles atteignant ses oreilles sont faussées ; il faut pour cela un certain apprentissage. Par exemple, Savel et Drake [54] ont montré que des plongeurs assidus (auditeurs exposés au milieu aquatique) identifient raisonnablement la direction d'un son sous l'eau, dans des conditions où des

non-plongeurs (auditeurs naïfs sur le plan de l'exposition au milieu aquatique) ne le peuvent absolument pas. Cet effet de l'exposition à un milieu altéré est attribué par les auteurs à des mécanismes d'adaptation du système auditif qui permettent une réorganisation de la cartographie auditive individuelle. Les recherches se poursuivent, au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique de Marseille pour tester la réalité ainsi que les limites de cette plasticité du système auditif. Dans un esprit voisin, Blum et al. (2004) [55] ont testé avec succès l'adaptabilité d'auditeurs à des HRTF étrangères, par «ré-étalonnage» de leurs fonctions auditives spatiales propres. Ils ont utilisé pour cela un type d'entraînement particulier, dit multi-modal, exploitant une méthode de retour proprioceptif manuel, dont les avantages sont expliqués dans la publication citée.

La mesure du niveau «sonore»

La métrologie acoustique a normalement pour objet de mesurer des niveaux de pression acoustique, exprimés en décibels. En matière d'environnement, cependant, la variable pertinente associée est plutôt le niveau sonore, c'est-à-dire le niveau subjectif ou niveau de la sensation auditive associée¹. Ce niveau sonore devrait plutôt être exprimé par la sonie, ou par le niveau d'isotonie qui en découle.

Ces notions de sonie et d'isotonie sont des produits de la psychoacoustique, et elles continuent de faire l'objet de recherches. D'une part, la sonie est essentiellement le résultat du codage de l'intensité acoustique par le système auditif, tel que mentionné dans la première section de cet article. Son étude se poursuit donc dans le cadre des recherches sur l'audition. Mais d'autre part, la sonie est une grandeur de premier plan dans le domaine de l'environnement sonore. L'effort se poursuit donc aussi pour aboutir à un outil qui permette sa mesure aisée et fiable [56 ; 57].

La mesure objective (si l'on peut dire) de la sonie est le plus souvent basée sur des logiciels progressivement mis au point par les équipes de Zwicker, en Allemagne, et de Moore, en Angleterre. Les versions les plus anciennes [58 ; 59], adaptées aux signaux stationnaires, donnent des évaluations de la sonie qui sont assez proches des résultats de mesures subjectives effectuées en laboratoire. Elles sont donc relativement fiables car, même si elles ne donnent pas exactement les mêmes valeurs numériques en sortie, ces valeurs sont généralement dans l'orbite de la dispersion des mesures subjectives. Concernant les sons non stationnaires et les sons impulsifs, la situation est plus incertaine. Les logiciels cités plus haut ont été modifiés par leurs auteurs pour intégrer les réponses impulsionnelles de l'oreille humaine. Mais à ce jour le recul est insuffisant pour apprécier la validité métrologique de ces dernières versions des logiciels.

Il faut tout de même ajouter que la sonie, si elle est essentiellement liée à l'intensité acoustique comme on l'a écrit ci-dessus, dépend aussi de fonctions cognitives difficiles à appréhender. C'est ainsi que Susini et Meunier ont pu montrer l'influence d'effets de récence et d'effets de mémoire, sinon sur la sonie instantanée, du moins sur la sonie globale d'un son non stationnaire de durée moyenne ou longue [60 ; 61 ; 62]. Or ce type de sons est

courant dans notre environnement, et il faut bien disposer aussi d'outils pour en mesurer la sonie. Les modèles déjà cités proposent des indicateurs, basés sur les calculs de la sonie instantanée, pour caractériser cet aspect long terme de la sonie. Mais la validité de ces indicateurs n'a pas encore été confirmée, à notre connaissance.

Évaluation subjective des techniques de protection contre le bruit

La psychoacoustique fait aussi son entrée progressivement dans le domaine de la lutte contre le bruit et surtout dans celui du contrôle actif. Tous les spécialistes l'ont remarqué, le contrôle actif du bruit produit des résultats souvent décevants lorsqu'il est abordé sous un angle purement physique : les atténuations atteintes sont moins impressionnantes, du point de vue subjectif, que ce que les mesures physiques laissent espérer. Et pourtant, si l'on trouve de nombreuses publications sur les caractéristiques physiques des solutions de contrôle actif, seuls quelques articles ont été consacrés aux effets subjectifs de ce contrôle et au ressenti des auditeurs [63 ; 64]. Or il arrive souvent qu'une réduction appréciable du niveau physique, produite par contrôle actif du bruit, ne se traduise que par une réduction négligeable du niveau subjectif, c'est-à-dire de la sonie.

Les apports possibles de la psychoacoustique aux problèmes de contrôle actif sont proches de ses contributions à la qualité acoustique. En effet, le contrôle actif entraîne une modification du signal acoustique, qui était a priori gênant. Il s'agit donc d'évaluer l'amélioration subjective que représente le contrôle, autrement dit d'évaluer la «qualité», au sens large, du signal contrôlé. Les indicateurs courants de la qualité ont été décrits par Fastl [65]. Ils dépendent des signaux. Mais le principal indicateur est la sonie, et dans une moindre mesure l'acuité. Et en effet, l'étude de Canévet et Mangiante [64] a montré que toute réalisation de contrôle actif doit commencer par un examen du profil de densité de sonie, puis être définie de manière à raboter les éventuelles émergences présentes sur ce profil, émergences qui sont généralement responsables de la gêne ressentie.

Dans le futur, on peut concevoir que le processus de contrôle comportera, en temps réel, un calcul du diagramme de densité de sonie du son, une recherche de minimisation du niveau d'isotonie ou de l'acuité, et finalement un façonnage spectral permettant cette minimisation. Les mêmes algorithmes que ceux présentés dans le précédent paragraphe pourraient donc être mis à profit pour ces traitements et pour l'évaluation des performances du contrôle actif.

La psychomécanique

La discipline a une quinzaine d'années, mais l'appellation est récente. De la même manière que la psychoacoustique traite des relations entre signaux sonores et sensations auditives induites, le terme de psychomécanique désigne l'étude des relations entre les caractéristiques intrinsèques

¹-Au sens, et dans l'esprit, de la norme NF S 30-105 (Vocabulaire de l'Acoustique), terme 08-25-010

des structures mécaniques et les attributs perceptifs des sons engendrés par leur mise en vibration.

Les études de psychomécanique ont commencé dans le domaine de l'acoustique des instruments de musique. On considère que le pionnier du domaine est Freed [66]. Ce dernier a procédé à des tests d'écoute sur des enregistrements de sons produits par des objets métalliques frappés par divers marteaux. Son but était d'identifier les paramètres acoustiques qui provoquent les diverses sensations induites et en particulier ceux qui déterminent l'impression de dureté du marteau.

En France, la principale contribution provient des équipes de Antoine Chaigne et de Steve McAdams, contribution matérialisée notamment par la thèse de Vincent Roussarie [45]. McAdams et al. [43], à partir d'un modèle de rayonnement de structure créé par Chaigne et Lambourg [67], ont examiné un problème un peu analogue à celui de Freed [66], à savoir les attributs perceptifs de sons rayonnés par des barres ou des plaques frappées. Ces structures avaient des géométries, des densités et des amortissements propres différents. Par une analyse multidimensionnelle des réponses à des tests de dissemblance, ils ont pu identifier un espace perceptif dans lequel pouvaient se répartir les différentes images auditives produites. Ils ont ensuite mis en correspondance les dimensions de cet espace et les propriétés mécaniques des structures.

Au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, les études de psychomécanique sont partiellement orientées vers le domaine très actuel de la qualité sonore des environnements et des produits. Les applications, et par conséquent les recherches sur le sujet, sont maintenant nombreuses. Le domaine des transports est parmi les plus riches²(confort acoustique dans une automobile, un train...). L'objet des recherches est donc l'étude complète du *transfert psychomécanique*, c'est-à-dire que l'on examine d'une part les caractéristiques physiques des vibrations des structures en fonction de leur mode d'excitation et de leurs propriétés mécaniques et géométriques, puis d'autre part les caractéristiques auditives, ou attributs perceptifs, des rayonnements produits par ces vibrations [68]. Autrement dit, les études habituelles de vibroacoustique sont élargies à une étude perceptive de l'effet des vibrations. Cette dernière porte sur l'ensemble des propriétés perceptives des signaux acoustiques, et sur les relations entre ces propriétés et les variables mécaniques. Mais au-delà de ces relations, l'intérêt se porte sur l'aspect «agrément» des signaux sonores et sur les solutions à envisager pour agir sur cet aspect, c'est-à-dire pour maîtriser leur niveau de qualité.

Il faut également signaler la remarquable étude de Faure et Marquis-Favre [69], sur le problème voisin de l'absorption du son par les cloisons ou les vitrages. Ce n'est plus tout à fait un problème de rayonnement, mais plutôt de transmission par les parois, dont la mise en équation est relativement bien maîtrisée. Pour un bruit extérieur donné, on peut donc déterminer le spectre des signaux transmis, puis évaluer leur qualité perceptive, par des tests psychoacoustiques convenablement choisis.

Les résultats de ces tests peuvent, en retour, renseigner sur les paramètres mécaniques de la structure (densité, épaisseur, module d'Young...) qui régissent la qualité de l'absorption produite. Des renseignements très intéressants sont effectivement fournis par les auteurs, concernant notamment le type de vitrage ou de châssis testés, le type de fixation ou de conditions aux limites entre plaque et support.

La procédure psychoacoustique plus ou moins commune à toutes ces études consiste à effectuer des tests de dissemblance sur une série choisie de signaux synthétiques résultant des calculs de rayonnements, puis d'évaluer la qualité de ces signaux (rayonnés ou transmis) par des mesures absolues d'agrément ou des mesures relatives de préférence. Les tests de dissemblance, associés à une analyse multidimensionnelle des jugements, permettent de révéler l'espace perceptif où se sont répartis les sons, ou plutôt les réponses auditives à ces sons. On tente alors de corrélérer les dimensions de cet espace aux caractéristiques mécaniques de la structure vibrante, pour identifier celles qui influent sur la perception. Les tests de préférence ou d'agrément global permettent d'évaluer la contribution de chaque paramètre physique de la structure à la qualité du rayonnement tel qu'il est perçu.

Références bibliographiques

- [1] Pressnitzer D., de Cheveigné A., McAdams S., Collet L., (2005). *Auditory signal processing : Physiology, Psychoacoustics, and Models*. New York, Springer.
- [2] Lorenzi C., Berthommier F., Apoux F., Bacri N., (1999). Effects of envelope expansion on speech recognition. *Hear. Res.*, 136, 131-138.
- [3] Avan P., Bonfils P., Gilain L., Mom T., (2003). Physiopathological significance of distortion-product otoacoustic emissions at 2f1-f2 produced by high- versus low-level stimuli. *Journal of the Acoustical Society of America*, 113, 430-441.
- [4] Micheyl C., Collet L., (1996). Involvement of the olivocochlear bundle in the detection of tones in noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 99, 1604-1610.
- [5] Pressnitzer D., Meddis R., Delahaye R., Winter I. M., (2001). Physiological correlates of comodulation masking release in the mammalian VCN. *J. Neurosci.*, 21, 6377-6386.
- [6] Edeline J.-M., (2003) The thalamo-cortical auditory receptive fields : regulation by the states of vigilance, learning and the neuromodulatory systems. *Exp. Brain Res.*, 153, 554-572.
- [7] Demany L., Semal C., (2002). Learning to perceive pitch differences. *Journal of the Acoustical Society of America*, 111, 1377-1388.
- [8] Giraud A. L., Lorenzi C., Ashburner J., Wable J., Johnsrude I., Frackowiak R., Kleinschmidt A., (2000). Representation of the temporal envelope of sounds in the human brain. *J. Neurophysiol.*, 84, 1588-1598.
- [9] Liégeois-Chauvel C., Lorenzi C., Trébuchon A., Regis J., Chauvel P., (2004). Temporal envelope processing in the human left and right auditory cortices. *Cereb. Cortex.*, 14, 731-40.
- [10] Bertrand O., Tallon-Baudry C., (2000). Oscillatory gamma activity in humans : a possible role for object representation. *Int J Psychophysiol.*, 38, 211-223.
- [11] Pressnitzer D., Ragot R., Ducorps A., Schwartz D., Baillet S., (2004). Is the auditory continuity illusion based on a change-detection mechanism ? A MEG study. *Proceedings of the Joint Congress CFA/DAGA'04*, 589-590.
- [12] de Cheveigné, A., (1998). Cancellation model of pitch perception. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103, 1261-1271.
- [13] Lorenzi C., Soares C., Vonner T., (2001). Second order temporal modulation transfer functions. *J. Acoust. Soc. Am.*, 110, 1030-1038.
- [14] Samson S., Ehrlé N., Baulac M., (2001). Cerebral substrate for musical temporal processes. *Ann N Y Acad Sci.*, 930, 166-178.
- [15] Tillmann B., Janata P., Bharucha J. J., (2003). Activation of the inferior frontal cortex in musical priming. *Cog. Brain Res.*, 16, 145-161.
- [16] Bregman A. S., (1990). *Auditory Scene Analysis : The perceptual Organization of Sound*. MIT Press, Cambridge, MA, USA.

²-La qualité sonore fait partie des thèmes du Groupe de recherche "Bruit des transports", dont on trouvera une description dans ce même numéro de la revue.

- [17] de Cheveigné A., (1997). Concurrent vowel segregation III : A neural model of harmonic interference cancellation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101, 2857-2865.
- [18] McAdams S., Bertoncini J., (1997). Organization and discrimination of repeating sound sequences by newborn infants. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102, 2945-2953.
- [19] Brochard R., Drake C., Botte M.-C., McAdams S., (1999). Perceptual organization of complex auditory sequences : effect of number of simultaneous subsequences and frequency separation. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*. 25, 1742-1759.
- [20] Botte M.-C., Drake C., Brochard R, McAdams SD., (1997). Perceptual attenuation of nonfocused auditory streams. *Percept. Psychophys.*, 59, 419-425.
- [21] Bey C., McAdams S., (2002). Schema-based processing in auditory scene analysis. *Percept Psychophys.*, 64, 844-854.
- [22] Grimault N., Micheyl C., Carlyon R.P., Arthaud P., Collet L., (2000). Influence of peripheral resolvability on the perceptual segregation of harmonic complex tones differing in fundamental frequency. *Journal of the Acoustical Society of America*, 108, 263-271.
- [23] McAdams S., (1989). Segregation of concurrent sounds. I : Effect of frequency modulation coherence. *Journal of the Acoustical Society of America*, 85, 2148-2159.
- [24] Grimault N., Micheyl C., Carlyon R.P., Collet L., (2002a). Evidence for two pitch encoding mechanisms using a selective auditory training paradigm. *Perception and Psychophysics*, 64, 189-197
- [25] Grimault N., Micheyl C., Carlyon R.P., Arthaud P., Collet L., (2001). Perceptual auditory stream segregation of sequences of complex sounds in subjects with normal and impaired hearing. *British J. of Audiol.*, 35, 173-182.
- [26] Demany L., Semal C., (sous presse). The slow formation of a pitch percept beyond the ending time of a short tone burst. *Perception and Psychophysics*.
- [27] Demany L., Montandon G., Semal C., (2004). Pitch perception and retention : two cumulative benefits of selective attention. *Perception and Psychophysics*, 66, 609-617.
- [28] Demany L., Clément S., Semal C., (2001). Does auditory memory depend on attention ? In : *Physiological and Psychophysical Bases of Auditory Function*, edited by D.J. Breebaart, A.J.M. Houtsma, A. Kohlrausch, V.F. Prijs & R. Schoonhoven. Shaker Publishing BV, Maastricht (The Netherlands), 461-467.
- [29] Clément S., Demany L., Semal C., (1999). Memory for pitch versus memory for loudness. *Journal of the Acoustical Society of America*, 106, 2805-2811.
- [30] Demany L., Montandon G., Semal C., (2005). Internal noise and memory for pitch. In : *Auditory Signal Processing : Physiology, Psychoacoustics, and Models*, edited by D. Pressnitzer, A. de Cheveigné, S. McAdams & L. Collet. Springer Verlag, New York, 230-236.
- [31] Demany L., Ramos C., (2005). On the binding of successive sounds : Perceiving shifts in nonperceived pitches. *Journal of the Acoustical Society of America*, 117, 833-841.
- [32] Semal C., Demany L., Ueda K., Hallé P.A., (1996). Speech versus nonspeech in pitch memory. *Journal of the Acoustical Society of America*, 100, 1132-1140.
- [33] Grimault N., Bacon S.P., Micheyl C., (2002b). Auditory stream segregation on the basis of amplitude-modulation rate. *Journal of the Acoustical Society of America*, 111, 1340-1348.
- [34] McAdams S., (1994). Reconnaissance de sources et d'événements sonores. In : *Penser les sons : Psychologie cognitive de l'audition*. S. McAdams & E. Bigand (Eds.), Presses Universitaires de France, Paris, 157-214.
- [35] Plomp R., (1970). Timbre as a multidimensional attribute of complex tones. In : *Frequency Analysis and Periodicity Detection in Hearing (397-414)*, R. Plomp & G. F. Smoorenburg (Eds.), Leiden : Sijthoff.
- [36] Grey J. M., (1977). Multidimensional perceptual scaling of musical timbres. *Journal of the Acoustical Society of America*, 61, 1270-1277.
- [37] Wessel D. L., (1979). Timbre space as a musical control structure. *Computer Music Journal*, 3(2), 45-52.
- [38] McAdams S., Winsberg S., Donnadiou S., De Soete G., Krimphoff J., (1995). Perceptual scaling of synthesized musical timbres : Common dimensions, specificities, and latent subject classes. *Psychological Research*, 58, 177-192.
- [39] Iverson P., (1995). Auditory stream segregation by musical timbre : Effects of static and dynamic acoustic attributes. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 21, 751-763.
- [40] Bey C., McAdams S., (2003). Post-recognition of interleaved melodies as an indirect measure of auditory stream formation. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 29, 267-279.
- [41] Ehresman D., Wessel D. L., (1978). Perception of timbral analogies. *Rapport Ircam*, n° 13. Paris.
- [42] McAdams S., Cunibile J. C., (1992). Perception of timbral analogies. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London, series B*, 336, 383-389.
- [43] McAdams S., Chaigne A., Roussarie V. (2004). The psychomechanics of simulated sound sources : Material properties of impacted bars. *Journal of the Acoustical Society of America*, 115, 1306-1320.
- [44] Lakato, S., McAdams S., Caussé R., (1997). The representation of auditory source characteristics : Simple geometric form. *Perception & Psychophysics*, 59, 1180-1190.
- [45] Roussarie V., (1999). Analyse perceptive des structures vibrantes. Thèse de doctorat, Université du Maine, Le Mans.
- [46] Susini P., McAdams S., Winsberg S., (1999). À multidimensional technique for sound quality assessment. *Acta Acustica*, 85, 650-656.
- [47] Susini P., McAdams S., Winsberg S., Perry I., Vieillard S., Rodet, X., (2004). Characterising the sound quality of air-conditioning noise. *Applied Acoustics*, 65, 763-790.
- [48] Lemaitre G., Susini P., Winsberg S., McAdams S., (2003). Perceptively based design of new car horns sounds. *Actes du International Conference on Auditory Display, University of Boston*.
- [49] Djelani T., Blauert J., (2001). Investigations into the build-up and breakdown of the precedence effect. *Acta acustica - ACUSTICA*, 87, 253-261.
- [50] Nicol R., Emerit M., (1999). 3D-sound reproduction over an extensive listening area : A hybrid method derived from holophony and ambisonic. *Actes de la 16e conférence internationale de l'AES*, 10-12 avril, Rovaniemi, Finlande.
- [51] Daniel J., Nicol R., Moreau S., (2003). Further investigations of high-order ambisonics and wavefield synthesis for holophonic sound imaging. *Actes de la 114e rencontre de l'AES*, 22-25 mars, Amsterdam, Hollande.
- [52] Djelani T., Pörschman C., Sahrhage J., Blauert J., (2000). An interactive virtual-environment generator for psychoacoustic research II : Collection of head-related impulse responses and evaluation of auditory localization. *ACUSTICA/acta acustica*, 86, 1046-1053.
- [53] Fels J., Buthmann P., Vorländer M., (2004). Head-related transfer functions of children. *Acta Acustica united with Acustica*, 90, 918-927.
- [54] Savel S., Drake C., (en révision). Adaptation in underwater sound localization by humans : towards a re-organization of spatial mapping.
- [55] Blum A., Katz B. F. G., Warusfel O., (2004). Eliciting adaptation to non-individual HRTF spectral cues with multi-modal training. *Actes du Congrès commun CFA/DAGA'04*, 1225 - 1226, Strasbourg, 22-25 mars.
- [56] Marozeau J., Boulet I., Meunier S., Gagneux F., Boussard P., (2004). Évaluation d'estimateurs de sonie. *Acoustique et Techniques*, n° 39, 27-34.
- [57] Seefeldt A., Crockett B., Smithers M., (2004). A new objective measure of perceived loudness. *Actes du congrès de l'AES*, 28-31 octobre, San Francisco, USA.
- [58] Paulus von E., Zwicker E., (1972). Programme zur automatischen Bestimmung der Lautheit aus Terzpegeln oder Frequenzgruppenpegeln. *ACUSTICA*, 27, 253-266.
- [59] Moore B. C. J., Glasberg B. R., Baer T., (1997). À model for the prediction of thresholds, loudness, and partial loudness. *J. Audio. Eng. Soc.*, 45, 224-240.
- [60] Meunier S., Susini P., Regal X., (1999). Effect of time distribution of energy on loudness evaluation. *Actes du Forum Acusticum*, 14-19 mars, Berlin, 5pPa12, S464.
- [61] Susini P., McAdams S., (2000). Effet de récence dans une tâche de jugement de la sonie. *5e Congrès français d'acoustique*, 430 - 432, août 2000, Lausanne, Suisse.
- [62] Meunier S., Marchioni A., (2002). Loudness of sounds with temporal variable intensity. *Actes du Forum Acusticum*, 16-20 septembre, Séville, réf. CD-ROM : Env-Gen-006.
- [63] Sommerfeldt S. D., Samuels T. O., (1996). Incorporation of loudness measures in active noise control. *Journal of the Acoustical Society of America*, 109, 591-599.
- [64] Canévet G., Mangiante G., (2004). Psychoacoustic assessment of active noise control. *Active 04*, 20-22 septembre, Williamsburg, Virginie, USA.
- [65] Fastl H., (1997). The psychoacoustics of sound-quality evaluation. *ACUSTICA acta acustica*, 83, 754-764.
- [66] Freed D. J., (1990). Auditory correlates of perceived mallet hardness for a set of recorded percussive sound events. *Journal of the Acoustical Society of America*, 87, 311-322.
- [67] Chaigne A., Lambourg C., (2001). Time-domain of damped impact plates. Part I. Theory and experiments. *Journal of the Acoustical Society of America*, 109, 1422-1432.
- [68] Canévet G., Habault D., Meunier S., Demirdjian F., (2004). Auditory perception of sounds radiated by a fluid-loaded vibrating plate excited by a transient point force. *Acta Acustica united with ACUSTICA*, 90, 181-193.
- [69] Faure J., Marquis-Favre C., (2005). Perceptual assessment of the influence of structural parameters for a radiating plate. *Acta Acustica united with ACUSTICA*, 91, 77-90.