

Enceintes acoustiques : perception et mesures

Mathieu Lavandier

School of Psychology

Cardiff University

Tower Building

Park Place

Cardiff, CF10 3AT

Royaume-Uni

Tél. : +44 (0)29 208 70078

E- mail: lavandiermn@cardiff.ac.uk

Résumé

De nombreuses études ont cherché à relier les mesures pouvant être effectuées sur des enceintes acoustiques avec la perception des auditeurs lors de tests d'écoute. Cet article a pour but de présenter les différentes approches adoptées pour réaliser ce lien. Les tests d'écoute doivent tout d'abord être rigoureusement contrôlés pour être exploitables. Ils donnent ensuite accès aux dimensions perceptives utilisées par les auditeurs pour évaluer les enceintes, qui peuvent être reliées à des évaluations plus globales de qualité ou de préférence. Différentes mesures ont été proposées pour prédire les résultats perceptifs, mais aucune ne fait encore consensus. Plusieurs exemples sont décrits afin d'illustrer les notions abordées.

Summary

Loudspeakers : perception and measurements

Several studies investigated the link between measurements of loudspeakers and the perception of listeners during listening tests. This paper presents the different approaches developed to look for this link. First, the listening tests have to be rigorously controlled for their results to be useful. They give access to the perceptual dimensions used by listeners to evaluate loudspeakers, which can be linked to overall judgments of quality or preference. Different types of measurement were proposed to predict the perceptual results, but no consensus was achieved yet. Examples are described to illustrate the notions discussed.

L

es mesures physiques normalisées [1, 2] utilisées de nos jours pour évaluer les enceintes acoustiques ne permettent pas de faire le lien avec ce que les auditeurs perçoivent lorsqu'ils utilisent ces enceintes. Ces mesures présentent l'avantage d'être reproductibles et comparables d'un laboratoire à l'autre, mais «les caractéristiques choisies, qui sont représentatives des qualités physiques des enceintes acoustiques, ne tiennent compte ni de certains facteurs extérieurs à l'enceinte acoustique comme le couplage de l'appareil au local d'écoute, ni des facteurs physiologiques et psychoacoustiques de l'audition» [3]. L'aspect perceptif caractérise pourtant de manière essentielle l'écoute du champ acoustique rayonné par une source sonore. «Les techniques actuellement utilisées pour les mesures objectives ne permettent pas une définition complète de la qualité de restitution sonore d'un haut-parleur; néanmoins, les mesures objectives peuvent donner une information essentielle sur la qualité des haut-parleurs» [4]. Ces mesures fournissent en effet de l'information, mais quelle partie de cette information est véritablement pertinente vis-à-vis de notre perception de la reproduction sonore? Dépourvus de critères objectifs quantifiables permettant d'évaluer leur travail, les fabricants sont freinés quant aux améliorations qu'ils pourraient apporter à leurs systèmes.

De nombreuses études ont cherché à déterminer des mesures acoustiques qui soient pertinentes d'un point de vue perceptif. Ces recherches ont permis de révéler les dimensions perceptives utilisées par les auditeurs comparant des enceintes [5, 6, 7, 8]. Des évaluations plus globales de qualité ou de préférence ont également été réalisées [9, 10, 11, 12]. Différentes mesures ont été proposées pour prédire au mieux ces résultats perceptifs. Avant de rechercher de telles mesures, il faut être capable d'évaluer correctement notre perception de la reproduction sonore. Pour cela, de nombreux paramètres expérimentaux sont à contrôler afin que les tests d'écoute soient exploitables.

Tests d'écoute rigoureusement contrôlés

Le contrôle des conditions d'écoute lors des tests perceptifs permet de s'assurer que les résultats sont caractéristiques des enceintes évaluées, et pas d'un autre facteur expérimental ayant influencé l'écoute [13]. La comparaison de différentes enceintes doit se faire dans une même pièce, pour des positions de l'enceinte et de l'auditeur identiques, avec un même extrait musical et au même niveau sonore. Une évaluation globale des enceintes devra faire intervenir

plusieurs extraits musicaux de style différents, plusieurs positions d'enceinte et les reproductions monophonique et stéréophonique devront être considérées.

La salle d'écoute et la position de l'enceinte influencent l'évaluation perceptive. Une différence de position des enceintes peut avoir plus d'effet que leur différence de modèle. Il est nécessaire d'effectuer les tests perceptifs dans une pièce correspondant à un salon domestique «moyen». Les mesures acoustiques normalisées étant réalisées en chambre anéchoïque ou en salle réverbérante, la différence d'environnement ne favorise pas le rapprochement des deux types d'évaluation. L'extrait musical utilisé lors d'un test d'écoute affecte également l'évaluation des enceintes. Une enceinte peut se comporter différemment lorsqu'elle est sollicitée par des signaux différents, qui peuvent notamment révéler des caractéristiques différentes de la reproduction sonore. Lors des tests d'écoute, le niveau de la reproduction sonore doit être égalisé, pour éviter que des différences de niveau ne masquent des différences plus subtiles. Illényi et Korpássy [14] ont également montré qu'augmenter le niveau de reproduction des enceintes permettait d'améliorer leur note de qualité.

aussi être comparées à la même position, une solution consiste à utiliser un plateau tournant permettant de déplacer rapidement les enceintes entre deux écoutes. La taille limitée du plateau restreint par contre le nombre d'enceintes pouvant être comparées au sein d'un même test. Une autre solution consiste à enregistrer les enceintes à la même position dans une pièce (Fig. 1), et à utiliser ces enregistrements lors de tests d'écoute au casque [15].

Le signal délivré aux oreilles de l'auditeur est modifié par les phases d'enregistrement et de restitution au casque, mais de la même façon pour toutes les enceintes. Ce protocole ne permet pas une évaluation absolue des enceintes, mais il permet d'évaluer des différences relatives, au moins en ce qui concerne la restitution du timbre, la composante spatiale de la reproduction sonore étant quant à elle trop déformée par la restitution au casque.

L'avantage est de pouvoir comparer un nombre important d'enceintes au sein d'une même expérience. Jusqu'à trente-sept enceintes ont ainsi pu être comparées au cours d'un même test [15].



Fig. 1 : Enregistrement de différents modèles d'enceinte dans la salle d'écoute de l'entreprise Mosquito. Ces enregistrements ont ensuite été utilisés lors de tests d'écoute au casque (Lavandier [15])

Recordings of different loudspeakers in the listening room of the Mosquito group. These recordings were then used in listening tests using headphones (Lavandier [15])

La procédure expérimentale ne doit pas corrompre les résultats du test. L'expérience doit être menée en double-aveugle: l'auditeur ne doit pas voir les enceintes ni savoir quelles enceintes il compare, mais l'expérimentateur ne doit pas non plus contrôler l'ordre de présentation des différents modèles qui doit être aléatoire. Les auditeurs entraînés sont plus stables et plus discriminants dans leurs jugements que les auditeurs n'ayant pas subi d'entraînement, tout en fournissant des résultats moyens équivalents [16]. Le recours à des auditeurs entraînés permet donc de réduire la durée de test en impliquant moins d'auditeurs. Il est ici question d'auditeurs spécialement et régulièrement entraînés pour l'évaluation de la reproduction sonore, pas simplement de musiciens ou d'audiophiles.

Notre mémoire auditive étant limitée à quelques secondes, comparer des enceintes impose de pouvoir les écouter l'une aussitôt après l'autre. Sachant qu'elles doivent

L'évaluation d'une enceinte dépendant des autres enceintes impliquées dans le test d'écoute, incorporer un nombre important de modèles permet d'obtenir des résultats plus indépendants du contexte. En outre, plus le test d'écoute implique d'enceintes différentes, plus l'expérimentateur pourra mettre en évidence des dimensions perceptives variées.

Différences perçues et dimensions perceptives sous-jacentes

Les études sur la perception de la reproduction sonore ont cherché à déterminer les critères, ou dimensions perceptives, utilisés par les auditeurs pour différencier les enceintes acoustiques. Ces recherches ont principalement impliqué deux types de test associés à deux techniques d'analyse statistique (Fig. 2).

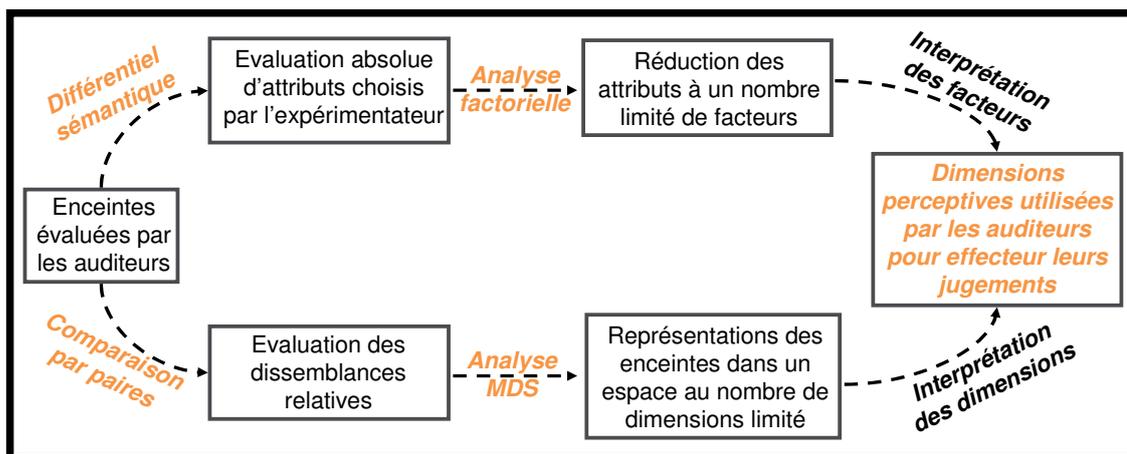


Fig. 2: Mise en évidence des dimensions perceptives de la reproduction sonore : différentiel sémantique et analyse factorielle, comparaisons par paires et analyse multidimensionnelle de proximité (MDS)

Revealing the perceptual dimensions of sound reproduction: semantic scales and factor analysis, paired comparison and multidimensional scaling (MDS)

Le premier type de test repose sur un différentiel sémantique associé à une analyse factorielle [17]. Les auditeurs notent chaque enceinte selon un grand nombre d'attributs préalablement choisis par l'expérimentateur. Ces attributs ne sont pas forcément tous pertinents, ni tous indépendants. L'analyse factorielle, basée sur les corrélations entre attributs, permet ensuite de regrouper les attributs redondants, d'éliminer les attributs non pertinents, afin d'obtenir un nombre restreint de facteurs.

L'expérimentateur interprète alors ces facteurs comme les dimensions utilisées par les auditeurs pour effectuer leurs jugements. Même si les évaluations absolues d'un différentiel sémantique n'imposent pas en théorie des comparaisons rapides entre enceintes, dans la pratique ces tests sont basés sur de telles comparaisons, qui s'avèrent plus discriminantes que les évaluations individuelles. Lors d'une expérience réalisée par Gabriëlsson et Sjögren [6], les auditeurs ont évalué la reproduction sonore de neuf

Attributs	Facteurs		
	I	II	III
"distant"	0.88	0.21	-0.19
"équilibré"	-0.74	-0.58	-0.01
"agréable"	-0.70	-0.67	-0.11
"voilé"	0.92	0.09	0.21
"bruité/sifflements"	0.32	0.31	-0.22
"bruité/grondements"	0.27	0.55	0.73
"riche en détails"	-0.91	-0.27	0.01
"diffus"	0.89	0.30	0.20
"mat-terne"	0.55	-0.14	0.76
"en retrait/modéré"	0.90	-0.31	0.20
"plein (tonalité)"	-0.85	-0.27	0.29
"transparent"	-0.01	0.31	-0.64
"confus"	0.80	0.48	0.28
"épais"	0.75	0.55	0.25
"aigu"	0.25	0.88	-0.29
"dur (≠ mou)"	0.27	0.92	-0.09
"caverneux"	0.82	0.46	-0.16
"fermé"	0.95	0.18	0.10
"uniforme/lisse"	-0.67	-0.63	-0.04
"clair"	-0.87	-0.40	-0.16
"riche en contrastes"	-0.94	-0.17	0.02
"fort/bruyant"	-0.66	0.47	0.47
"froid"	0.43	0.68	-0.50
"brillant/lumineux"	-0.23	0.38	-0.83
"aéré"	-0.91	-0.20	-0.16
"faible"	0.96	-0.02	-0.11
"doux"	-0.39	-0.85	0.11
"grondant"	0.17	0.40	0.88

Attributs	Facteurs		
	I	II	III
"juteux/succulent"	-0.79	-0.11	0.48
"sombre"	0.08	-0.21	0.93
"naturel"	-0.84	-0.47	0.01
"proche"	-0.82	-0.35	0.17
"confiné en un point"	0.78	0.30	-0.18
"gênant/parasite"	0.26	0.90	0.17
"propre/pur"	-0.85	-0.41	-0.08
"sensation de salle"	-0.90	-0.29	0.01
"pointu/aiguisé"	-0.16	0.85	-0.35
"griffant"	0.61	0.60	-0.03
"criant"	0.40	0.87	-0.11
"rugueux/rauque"	0.75	0.53	0.19
"cliquant/percussif"	0.48	0.85	0.00
"hurlant/vociférant"	0.41	0.89	0.02
"pointu-anguleux"	0.27	0.86	-0.35
"craquements"	0.67	0.67	-0.01
"fort (niveau)"	-0.52	0.68	0.42
"dur (≠ doux)"	0.75	0.49	-0.04
"brouillé"	0.86	0.41	0.18
"sec"	0.85	0.24	-0.20
"étroit-étriqué"	0.89	0.37	0.04
"fatigant"	0.61	0.74	0.11
"étroit-fin"	0.64	0.46	-0.53
"distinct/clair"	-0.80	-0.53	-0.19
"dense"	-0.39	-0.12	0.78
"aiguisé/vif"	0.24	0.88	-0.26
"ouvert"	-0.92	-0.22	-0.12

Fig. 3: L'analyse factorielle met en évidence trois facteurs principaux parmi les cinquante-cinq attributs utilisés pour évaluer les enceintes, et présente la corrélation entre attributs et facteurs (Gabriëlsson et Sjögren [6])

The factor analysis highlights three main factors among the fifty-five attributes used to evaluate the loudspeakers, and presents the correlation between attributes and factors (Gabriëlsson and Sjögren [6])

enceintes selon cinquante-cinq attributs (Fig. 3). L'analyse factorielle a révélé trois facteurs principaux utilisés par les auditeurs. Le facteur I a été interprété comme un critère général de qualité associant clarté, sensation d'espace et proximité. Le facteur II a été relié au caractère plus ou moins dur ou doux de la reproduction sonore, tandis que le facteur III a été associé à son caractère brillant ou sombre.

Un deuxième type de test fait intervenir une évaluation de dissemblance associée à une analyse multidimensionnelle de proximité (MDS) [18]. Les auditeurs évaluent la dissemblance entre toutes les enceintes présentées par paires. L'analyse MDS représente ces dissemblances par des distances entre les enceintes symbolisées par des points dans un espace multidimensionnel. Deux enceintes perçues comme similaires seront très proches dans cet espace, tandis que deux enceintes perçues comme très différentes seront éloignées. L'analyse MDS teste des espaces ayant un nombre croissant de dimensions, et conserve comme résultat l'espace ayant le moins de dimensions pour lequel les distances entre enceintes sont suffisamment proches des dissemblances perçues. Les dimensions de cet espace sont interprétées comme les dimensions

perceptives utilisées par les auditeurs pour estimer les dissemblances entre enceintes. Les auditeurs n'ont pas à connaître, décrire ou même avoir conscience des critères sur lesquels ils se basent. La figure 4 présente le résultat d'une expérience impliquant douze enceintes enregistrées dans une salle d'écoute (Lavandier et coll. [8]). Lors du test perceptif réalisé au casque, les auditeurs ont comparé les enceintes deux-à-deux et évalué leur dissemblance entre 0 et 1. Les deux dimensions mises en évidence par l'analyse MDS de ces dissemblances ont été interprétées comme la balance grave-aigu et l'émergence du bas-médium.

La plupart des études réalisées dans les années 70 et 80 ont porté sur la restitution du timbre. Les dimensions perceptives mises en évidence sont la clarté, la dureté-acuité et le caractère «plein» ou «étroit» de la reproduction, la brillance, la sensation d'espace, la présence-proximité, l'amplification des graves ou des aigus, les sons parasites. Cette liste synthétise les résultats provenant de différentes études, et il n'est pas certain que toutes ces dimensions soient indépendantes. Avec le développement des systèmes de restitution multicanale, ces recherches ont laissé place ces dernières années à l'étude de la composante spatiale

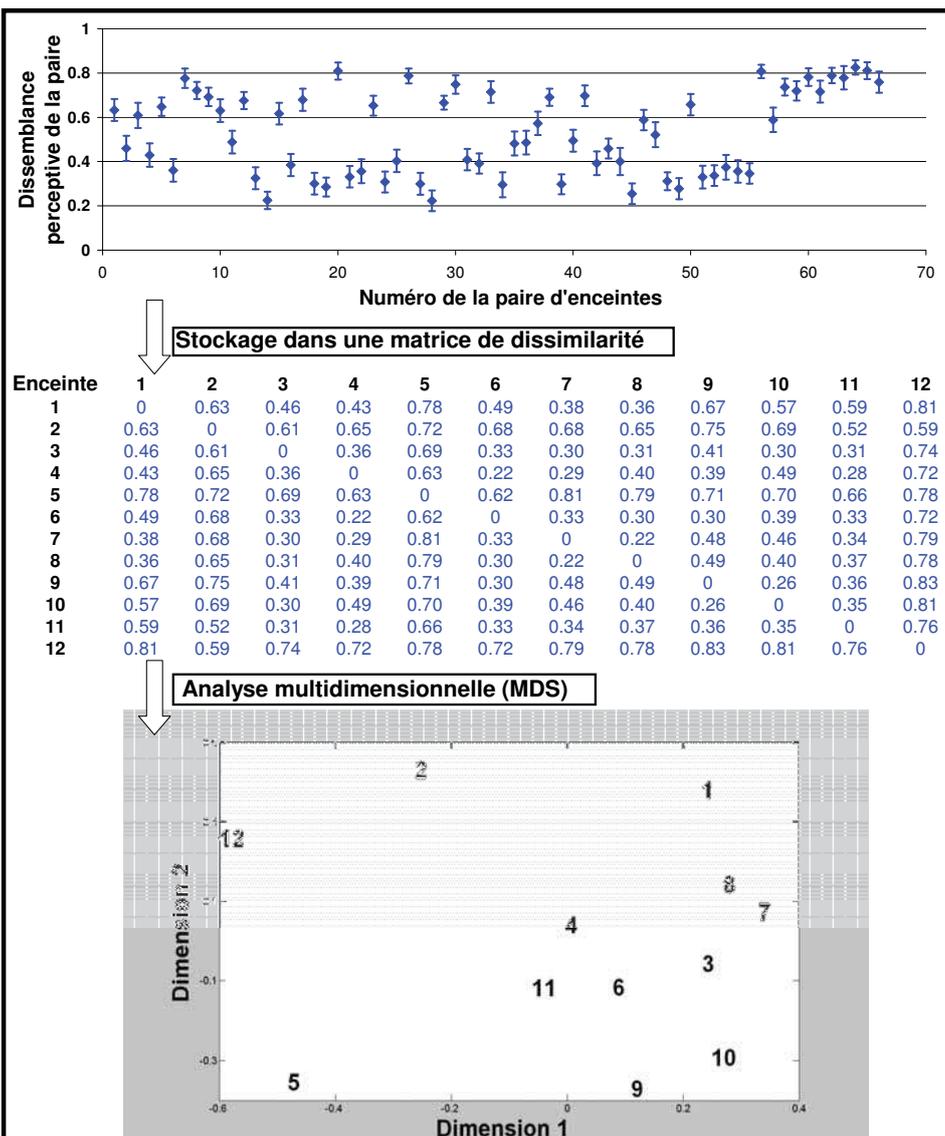


Fig. 4: Des différences perçues aux dimensions perceptives sous-jacentes : l'analyse multidimensionnelle fait correspondre les dissemblances perçues entre enceintes et les distances entre ces enceintes au sein d'un espace perceptif, révélant ainsi les critères utilisés par les auditeurs lors de leurs jugements de dissemblance (Lavandier et coll. [8])

From perceived dissimilarities to perceptual dimensions: the multidimensional analysis maps the perceived dissimilarities between loudspeakers to distances between these loudspeakers within a perceptual space, revealing the criteria used by listeners in their dissimilarity judgments (Lavandier et coll. [8])

de la reproduction sonore. Les résultats concernant les dimensions perceptives associées à cette composante sont moins établis, mais des protocoles de test se développent et devraient permettre des avancées.

Qualité globale et préférence

La qualité des enceintes a également été évaluée de façon globale. La question est alors de savoir si l'auditeur aime ou non la reproduction sonore, s'il trouve une enceinte meilleure ou plus fidèle qu'une autre. Différentes échelles d'évaluation ont été utilisées. Certaines font directement référence aux goûts de l'auditeur (préférence et agrément), d'autres lui demandent de comparer la reproduction sonore à l'idée qu'il se fait d'une reproduction parfaite (fidélité et naturel de la reproduction). Les échelles de qualité et d'impression globale laissent à l'auditeur le choix de baser son jugement sur ce qu'il aime et/ou sur ce qu'il considère être une reproduction fidèle. Ces différentes échelles sont très corrélées entre elles. Des tests réalisés en reproduction stéréophonique ont également montré que la qualité sonore et la qualité spatiale étaient bien corrélées [5, 10]. Le nombre limité d'enceintes impliquées dans ces tests peut néanmoins expliquer que la composante spatiale de la reproduction sonore n'est pas apparue de façon indépendante.

Ces évaluations globales sont censées prendre en compte, consciemment ou inconsciemment de la part de l'auditeur, l'ensemble des dimensions perceptives qui a été évoqué précédemment. Des évaluations selon chaque dimension ont été associées aux évaluations globales, afin d'estimer l'importance relative des dimensions perceptives. La clarté et la sensation d'espace se sont avérées être les dimensions les plus corrélées aux évaluations de fidélité, suivies par le caractère «plein» ou «étroit» de la reproduction [9]. La perception des basses fréquences constitue un facteur important vis-à-vis de la préférence des auditeurs, tandis qu'un excès de médium ou d'aigu est perçu de façon négative, la balance spectrale perçue étant potentiellement une bonne prédiction de la préférence [11]. L'objectif de ces évaluations perceptives est bien sûr de trouver une mesure acoustique qui permette de les remplacer.

Mesures pertinentes vis-à-vis de la perception

La réponse en fréquence des enceintes est le principal paramètre à mesurer pour caractériser leur restitution du timbre, mais il n'existe pas de consensus sur la meilleure façon de mesurer cette réponse [19]. Une mesure anéchoïque dans l'axe de l'enceinte évalue son champ direct, les mesures hors axe présentent l'influence des premières réflexions dans une salle d'écoute, tandis que la puissance totale rayonnée informe sur le champ réverbéré. Ces mesures peuvent être effectuées dans différents environnements : chambre anéchoïque, salle réverbérante ou salle d'écoute. Toutes ces réponses en fréquence ne peuvent pas être plates en même temps. Un critère évaluant la qualité de l'enceinte doit donc être défini plus précisément. Pour cela, trois approches ont été tentées.

La première consiste à rechercher des tendances sur la forme des réponses fréquentielles des enceintes expliquant leurs évaluations perceptives [5, 19, 20]. Les comparaisons

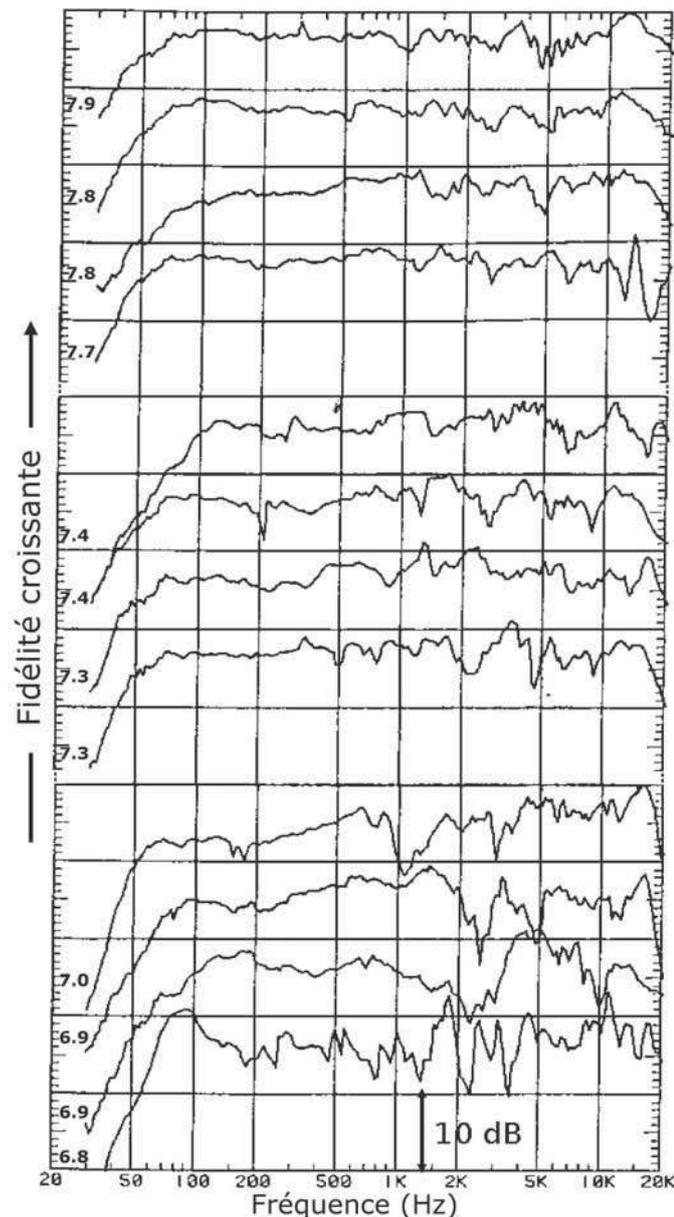


Fig. 5 : Amplitudes des réponses anéchoïques dans l'axe de douze enceintes, classées par ordre croissant de leur fidélité évaluée entre 0 et 10 (Toole [20])

Amplitudes of the anechoic on axis responses of twelve loudspeakers, ranked according to their fidelity rating between 0 and 10 (Toole [20])

visuelles sont réalisées pour différents types de mesure, et la mesure la plus facilement interprétable est considérée comme la mesure pertinente vis-à-vis de la perception. Ces comparaisons sont complexes à réaliser, car de nombreux critères sont à interpréter simultanément sur les courbes de réponses ; comme le montre la figure 5 présentant les réponses anéchoïques de douze enceintes classées par ordre croissant de fidélité (Toole [20]). Une comparaison visuelle ne permet pas de quantifier le lien entre mesure et perception, ce lien restant entièrement dépendant de l'interprétation de l'expérimentateur. Ainsi, la mesure jugée la plus pertinente diffère d'un auteur à l'autre. Certains préconisent une mesure en salle d'écoute,

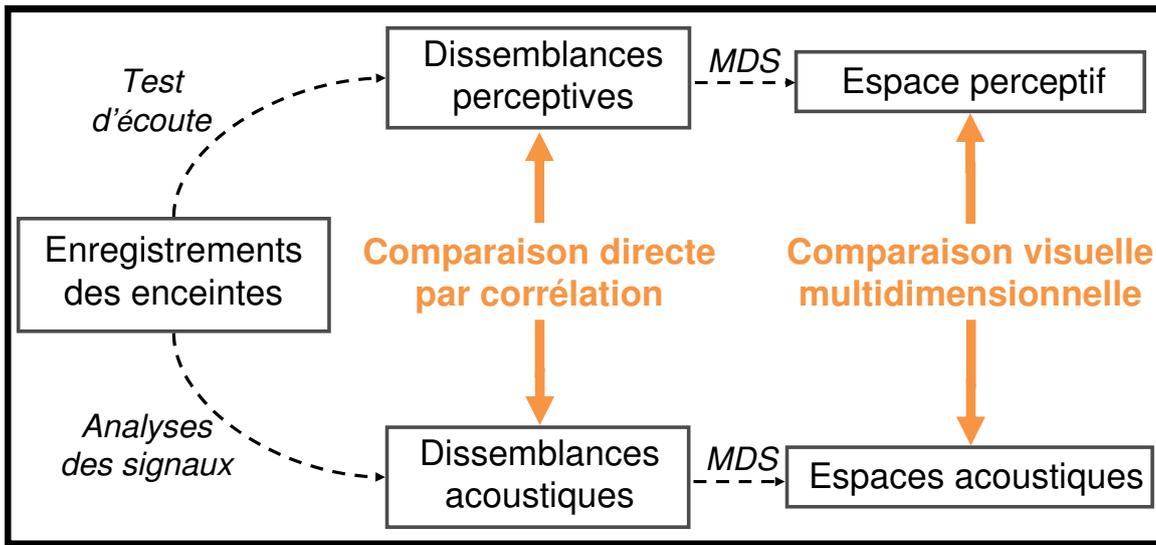


Fig. 6: Détermination d'une analyse des enregistrements des enceintes permettant de retrouver les dissemblances perçues par les auditeurs. Les dissemblances acoustiques provenant de chaque analyse sont comparées aux dissemblances perceptives, en calculant la corrélation entre dissemblances et en comparant visuellement les espaces acoustiques à l'espace perceptif (Lavandier et coll. [8])

Determination of an analysis of the recordings of loudspeakers highlighting the dissimilarities perceived by listeners. The acoustical dissimilarities obtained using each analysis are compared to the perceptual dissimilarities, by computing the correlation between dissimilarities and visually comparing the acoustical spaces to the perceptual one (Lavandier et coll. [8])

tandis que d'autres préféreront la combinaison de réponses anéchoïques mesurées à différents azimuts et élévations. Les résolutions fréquentielles recommandées varient du vingtième d'octave à l'octave. Certains prennent en compte le spectre des extraits musicaux utilisés lors des tests d'écoute, et d'autres associent un modèle auditif [21] à leur mesure pour se rapprocher de la perception. La seconde approche se base sur des modèles tels que celui d'Olive [12] qui prédit la préférence des auditeurs à partir de mesures anéchoïques. Ces modèles fournissent

une note d'évaluation globale à partir de nombreuses mesures de l'enceinte, par le biais de régressions linéaires multiples ou de réseaux de neurones permettant de caler l'évaluation acoustique sur le résultat perceptif. Les mesures considérées en entrée du modèle d'Olive sont la réponse en fréquence dans l'axe, dans la «fenêtre d'écoute» (zone de l'espace définie par des directions horizontales à plus et moins trente degrés par rapport à l'axe de l'enceinte et des directions verticales à plus et moins dix degrés), la puissance rayonnée, et une simulation de la réponse en

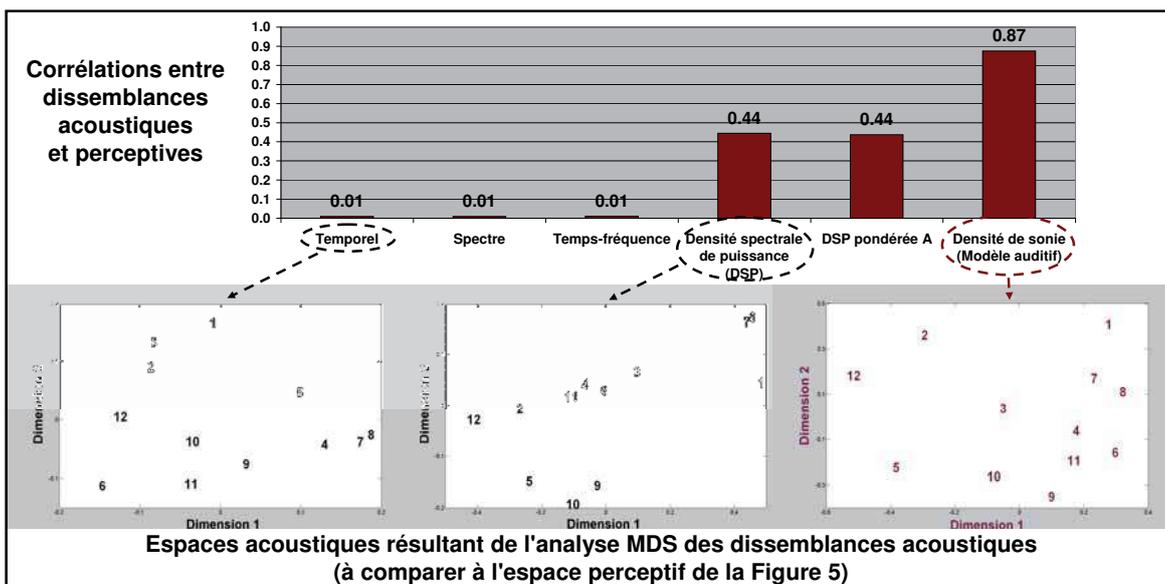


Fig. 7: Résultats de la comparaison des dissemblances acoustiques et perceptives évoquée sur la figure 6 (Lavandier [15])

Results of the comparison of the acoustical and perceptual dissimilarities discussed on Figure 6 (Lavandier [15])

salle d'écoute. Une régression multiple sur de nombreux attributs définis sur ces courbes de réponse fournit une note de préférence. Le lien entre mesure et perception est quantifié en comparant les notes de préférence provenant des auditeurs et des mesures. Les prédictions obtenues sont très bonnes, mais les mesures impliquées nécessitent de gros moyens. De plus, un tel modèle ne permet pas de relier dimensions perceptives individuelles et mesures acoustiques.

La troisième approche consiste à rechercher des attributs acoustiques décrivant chacune des dimensions perceptives [7, 8]. Lavandier et coll. [8] ont défini de tels attributs sur des enregistrements d'enceintes en salle d'écoute. Au préalable, ils ont testé différentes analyses de leurs enregistrements, afin de déterminer celle permettant de retrouver des différences entre enceintes similaires à celles qui sont évaluées par les auditeurs. Les enregistrements ont été comparés dans le domaine temporel, fréquentiel et temps-fréquence. Le domaine fréquentiel a été considéré avec (spectre) ou sans (densité spectrale de puissance) les informations de phase. La pondération A a été testée, ainsi qu'un modèle auditif calculant la densité de sonie des enregistrements, c'est-à-dire une estimation de leur spectre «perçu» prenant en compte les effets de masquage auditif [21]. Pour chaque analyse, une métrique évaluant la dissemblance entre deux enregistrements a été définie [15]. Les dissemblances acoustiques calculées ont ensuite été comparées aux dissemblances perceptives (Fig. 6). Seule l'analyse utilisant un modèle auditif a permis un rapprochement avec la perception en fournissant des dissemblances acoustiques très similaires aux dissemblances perceptives : les dissemblances sont bien corrélées, et les espaces acoustique et perceptif sont très proches (Fig. 7). Ce résultat a été obtenu avec différents extraits musicaux, prises de son, salles d'écoute, panels d'enceintes et modes de reproduction. Deux attributs acoustiques ont alors été définis sur la densité de sonie des enregistrements. Ils décrivent les deux dimensions perceptives mises en évidence lors des tests d'écoute (Fig. 4), en évaluant la balance grave-aigu et l'émergence du bas-médium des enregistrements [15].

Une mesure des enceintes qui soit pertinente vis-à-vis de la perception et reconnue par tous n'existe pas encore. Les différentes propositions s'éloignent toutes des mesures normalisées pour se rapprocher des conditions d'écoute. Lorsque la mesure n'est pas effectuée en salle d'écoute, cet environnement est simulé plus ou moins complètement à partir de mesures anéchoïques. Après l'influence de la pièce, certaines méthodes considèrent l'influence de l'extrait musical, puis celle du système auditif. La mesure est finalement moins caractéristique des seules enceintes, mais il est plus facile de la relier aux jugements des auditeurs.

Conclusion

Réaliser des tests d'écoute rigoureusement contrôlés permet de mettre en évidence les dimensions perceptives utilisées par les auditeurs pour évaluer la reproduction sonore. L'importance respective de chaque dimension vis-à-vis de la qualité globale de la reproduction ou de la préférence des auditeurs peut ensuite être estimée. Les

mesures acoustiques normalisées ne permettent pas de prédire ces évaluations perceptives. De nombreuses recherches ont permis de définir des mesures qui se rapprochent davantage des conditions d'écoute et sont ainsi mieux reliées à la perception, mais aucune ne fait encore consensus.

Remerciements

L'auteur tient à remercier Sabine Meunier et Mickael Deroche pour leur relecture avisée d'une version préliminaire de ce manuscrit. La rédaction de cet article a été supportée par un financement accordé à John Culling par l'EPSRC (Royaume-Uni).

Références bibliographiques

- [1] IEC Publication 60268-5. Sound system equipment - Part 5: Loudspeakers. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 1989
- [2] Norme NF 61305 5. Équipements et systèmes audio grand public haute fidélité. Méthodes pour mesurer et spécifier les performances - Partie 5 : Haut-parleurs. Association Française de Normalisation (AFNOR), 2005
- [3] Norme NF C97-405. Matériels et systèmes haute fidélité. Enceintes acoustiques - Règles. Association Française de Normalisation (AFNOR), 1980
- [4] IEC Publication 60581-7. High fidelity audio equipment and systems. Minimum performance requirements - Part 7: Loudspeakers. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 1986
- [5] H. Staffeldt. Correlation between subjective and objective data for quality loudspeakers. *J. Audio Eng. Soc.*, 22(6):402-415, July/August 1974
- [6] A. Gabrielson and H. Sjögren. Perceived sound quality of sound-reproducing systems. *J. Acoust. Soc. Am.*, 65(4):1019-1033, April 1979
- [7] W. Klippel. Multidimensional relationship between subjective listening impression and objective loudspeaker parameters. *Acustica*, 70:45-54, March 1990
- [8] M. Lavandier, P. Herzog, and S. Meunier. Physical and perceptual estimation of differences between loudspeakers. *Comptes Rendus Mécanique*, 334(12):732-736, December 2006
- [9] A. Gabrielson and B. Lindstrom. Perceived sound quality of high-fidelity loudspeakers. *J. Audio Eng. Soc.*, 33(1/2):33-53, January/February 1985
- [10] F.E. Toole. Subjective measurements of loudspeaker : sound quality and listener performance. *J. Audio Eng. Soc.*, 33(1/2):2-32, January/February 1985
- [11] S. E. Olive. A multiple regression model for predicting loudspeaker preference using objective measurements: Part 1 - Listening test results. In AES 116th Convention, number 6113, May 2004
- [12] S. E. Olive. A multiple regression model for predicting loudspeaker preference using objective measurements: Part 2 - Development of the model. In AES 117th Convention, number 6190, October 2004
- [13] IEC Publication 60268-13. Sound system equipment - Part 13: Listening tests on loudspeakers. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 1998
- [14] A. Illényi and P. Korpásky. Correlation between loudness and quality of stereophonic loudspeakers. *Acustica*, 49(4):334-336, 1981
- [15] M. Lavandier. Différences entre enceintes acoustiques : une évaluation physique et perceptive. Thèse de Doctorat, Université de la Méditerranée - Aix-Marseille II, 2005. [<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00087414>]
- [16] S. Bech. Selection and training of subjects for listening tests on sound-reproducing equipment. *J. Audio Eng. Soc.*, 40(7/8):590-610, July/August 1992
- [17] W. R. Dillon and M. Goldstein. Multivariate analysis. Methods and applications. John Wiley & Sons, 1984
- [18] I. Borg and P. Groenen. Modern multidimensional scaling. Theory and applications. Springer, 1997
- [19] F.E. Toole. Loudspeaker measurements and their relationship to listener preferences: Part 1. *J. Audio Eng. Soc.*, 34(4):227-235, April 1986
- [20] F.E. Toole. Loudspeaker measurements and their relationship to listener preferences: Part 2. *J. Audio Eng. Soc.*, 34(5):323-348, May 1986
- [21] E. Zwicker and H. Fastl. Psychoacoustics: facts and models. Springer, 1999