

Consultez les discussions, les statistiques et les profils d'auteurs pour cette publication sur :<https://www.researchgate.net/publication/294754443>

Tests subjectifs des pilotes de compression

Article dans *Journal de l'Audio Engineering Society* · Décembre 2005

CITATIONS

2

LECTURES

582

3 auteurs, y compris:



[Roberto Magalotti](#)

Bowers & Wilkins

11 PUBLICATIONS 29 CITATIONS

VOIR LE PROFIL

Tests subjectifs des pilotes de compression*

COMTE R. GEDDES, *Boursier AES*

GedLee LLC, Northville, MI 48167, États-Unis

LIDIA W. LEE

Université de l'Est du Michigan, Ypsilanti, MI 48197, États-Unis

ET

ROBERTO MAGALOTTI, *Membre de l'AES*

B&C Speakers, Florence, Italie

Un test subjectif a été conçu et réalisé afin d'évaluer les facteurs influençant la perception du son émis par les haut-parleurs à compression. Un passage musical a été filtré passe-haut et joué par trois haut-parleurs à compression de caractéristiques similaires, chargés par un tube à ondes planes, puis enregistré. Afin d'obtenir différents niveaux de distorsion non linéaire, le passage a été joué à trois niveaux de tension différents sur chaque haut-parleur. Les fichiers sonores obtenus ont été recombinaés avec la partie filtrée passe-bas, produisant neuf morceaux sonores complets dont les seules différences par rapport au passage original résultaient du comportement des haut-parleurs. Les neuf stimuli ont ensuite été présentés, en double aveugle, à 27 sujets, à qui il a été demandé d'évaluer les différences audibles par rapport au passage original. L'analyse des résultats montre que les différences de réponse en fréquence entre les haut-parleurs sont statistiquement significatives, tandis que les différences de niveau de jeu, et donc de distorsion non linéaire, ne sont pas significatives. Ce résultat inattendu implique que la distorsion non linéaire n'est pas audible dans ces conditions de test et conduit à des conclusions importantes concernant les objectifs de conception des haut-parleurs à compression.

0 INTRODUCTION

Ce rapport d'ingénierie repose sur la volonté d'apporter des modifications à la conception des moteurs de compression afin d'améliorer la perception de ces produits sur le marché. L'objectif principal, à savoir optimiser la conception d'un moteur de compression pour sa perception subjective, nécessite deux éléments d'information distincts, mais connexes. Le premier concerne les facteurs subjectifs qui influencent la perception du produit, et le second les facteurs techniques objectifs qui influencent les facteurs subjectifs significatifs. Deux tâches principales sont donc nécessaires pour améliorer la qualité perçue d'un moteur de compression. La première consiste à examiner ces facteurs.

aspects perceptifs les plus significatifs dans l'évaluation de la qualité sonore ; et deuxièmement, examiner les facteurs objectifs de la technologie des haut-parleurs de compression qui influencent les aspects perceptifs les plus significatifs de leurs performances. Ces deux tâches sont indispensables pour atteindre l'objectif principal. La simple connaissance des aspects techniques des performances d'un haut-parleur de compression ne permet pas d'évaluer l'influence de ces facteurs sur la perception de la qualité sonore par l'utilisateur final, et la simple connaissance des facteurs affectant la qualité sonore perçue ne permet pas d'identifier les modifications de conception souhaitables. Ainsi, outre les mesures objectives standard, il est nécessaire de réaliser des expériences psychoacoustiques pour déterminer le lien entre les aspects techniques et la perception subjective. C'est le thème central de cette étude.

Ce rapport se concentre sur la première tâche (subjective) telle que définie. Il convient toutefois de noter qu'en l'absence de l'un ou l'autre de ces deux éléments – objectif et subjectif –, on ne peut que

* Manuscrit reçu le 26 septembre 2005 ; révisé les 30 novembre et 1er décembre 2005.

devinez comment l'optimisation de la perception du client doit être réalisée.

1 L'EXPÉRIENCE

Une expérience a été conçue pour déterminer l'importance perceptuelle de deux formes de distorsion communément admises comme présentes dans un haut-parleur (plus précisément, un haut-parleur à compression) et limitant ses performances : 1) la distorsion linéaire ou réponse en fréquence, et 2) la distorsion non linéaire. Dans cette expérience, il est nécessaire de minimiser les variables externes et non contrôlées, ne conservant ainsi que les variables de contrôle : distorsion linéaire et non linéaire (appelées « source » et « niveau » dans cette étude ; voir section 2.1).

La procédure privilégiée pour obtenir notre première information consiste à identifier les variables subjectivement importantes à l'aide d'un test de stimulus de référence, puis à réaliser une évaluation qualitative de ces variables à l'aide d'un protocole de test offrant les meilleures perspectives d'évaluation qualitative (voir annexe). Autrement dit, il faut d'abord identifier les variables les plus importantes, puis les quantifier ou les échelonner plus précisément.

2 MÉTHODE

2.1 Conception expérimentale

Deux facteurs ont été étudiés selon un plan expérimental 3 × 3 (deux facteurs avec trois conditions pour chaque facteur). Le premier facteur est la source, où trois pilotes de compression différents ont été utilisés. Le second facteur est le niveau, où des signaux ont été envoyés à chaque pilote à trois niveaux de tension différents.

Les haut-parleurs étaient tous des modèles de production actuels de haute qualité, provenant de trois fabricants différents. Ils présentaient tous les mêmes caractéristiques communes :

- Dôme en titane sur bobine mobile en aluminium bobinée de 100 mm
- Bouchon de déphasage en cinq parties (sortant sur quatre fentes annulaires)
- gorge de 50 mm
- 8-- impédance nominale
- Aimant NdFeB.

Les réponses en fréquence réelles des haut-parleurs doivent être conservées pour des raisons de confidentialité. Cette information, qui intéresserait certainement le lecteur, n'a aucune incidence sur les résultats obtenus lors de cette expérience. Sa divulgation révélerait cependant l'identité des trois haut-parleurs, car les réponses en fréquence sont une sorte de signature d'un produit. Ils étaient tous similaires, mais présentaient des différences notables, notamment aux fréquences les plus élevées.

Les niveaux d'enregistrement ont été ajustés de manière à ce que chaque stimulus ait le même niveau RMS enregistré. Ainsi, les stimuli présentaient pratiquement le même niveau sonore perçu à la lecture, même s'ils étaient diffusés à trois niveaux sonores différents. Ceci est vrai, bien sûr, uniquement parce que les stimuli provenaient tous du même morceau de musique et ne présentaient que de faibles différences de distorsions linéaires et non linéaires, ce qui n'avait pas d'effet significatif sur les niveaux sonores perçus.

Au total, neuf stimuli ont été utilisés selon les deux dimensions de la source et du niveau. Une différence statistiquement significative de la source de l'effet principal indiquerait que les sujets pouvaient détecter des distorsions linéaires (réponse en fréquence) dans les conducteurs, et une différence significative du niveau de l'effet principal indiquerait que les sujets pouvaient percevoir une distorsion non linéaire dans les conducteurs. Des effets d'interaction entre la source et le niveau sont également possibles et ont été analysés.

Un stimulus de référence (le passage original non modifié) était disponible tout au long de l'expérience. Les sujets étaient encouragés à évaluer le niveau de perception de la distorsion du stimulus test en comparant le stimulus de référence.

Les stimuli ont été présentés à l'aide d'écouteurs intra-auriculaires Etymotic ER4B, diffusés via une carte son Turtle Beach Santa Cruz. Ces écouteurs présentent une très faible distorsion interne et une réponse en fréquence raisonnable. Une écoute comparative réalisée par les auteurs n'a pas révélé que le son émis par les écouteurs était un facteur déterminant dans l'expérience, contrairement à ce qui aurait été le cas si la distorsion des écouteurs avait été supérieure à celle du stimulus lui-même. Il est très peu probable que ces écouteurs présentent les niveaux de distorsion observés dans les haut-parleurs utilisés lors de ce test.

L'expérience a été réalisée en double aveugle, c'est-à-dire que l'administrateur du test ignorait l'objectif du test ni les variables étudiées. De plus, un maximum d'informations lui a été caché afin d'éviter tout impact sur les résultats, ce qui aurait pu se produire s'il les avait connues. Les facteurs déterminants seront simplement désignés par les termes « source 1 », « 2 » et « 3 » et les niveaux par les termes « niveau 1 », « 2 » et « 3 ».

2.2 Stimulus

Le passage musical sélectionné pour cette expérience était un segment de 15 secondes de *Brûler la maison (en direct)* Par Talking Heads, à partir de la 129e seconde d'enregistrement. Ce morceau a été choisi car une étude antérieure (non publiée) a démontré qu'il entraînait une sensibilité accrue à la perception de la distorsion du signal.

Un seul canal de l'enregistrement original a été utilisé afin d'obtenir un signal monophonique. Ce signal monophonique a été transmis via un réseau de croisement Butterworth du troisième ordre, dont la fréquence de croisement est de 800 Hz. Le traitement du signal a été réalisé à l'aide de MatLab Signal Processing Toolbox et de MathCAD.

Les signaux filtrés passe-haut et passe-bas ont été enregistrés sur les deux canaux d'un fichier audio PCM. Les signaux ont été émis et enregistrés par la carte son. La partie passe-bas a été renvoyée vers l'un des canaux d'enregistrement. La partie passe-haut a été amplifiée par un Crown Macro-Tech 5000VZ et transmise au compresseur testé. La sortie acoustique du compresseur a été enregistrée avec un microphone à pression Bruel & Kjaer de 6,3 mm et envoyée vers l'autre canal d'enregistrement. L'enregistrement résultant présentait alors la partie passe-bas sur un canal, en sortie de la carte son, et la partie passe-haut sur l'autre canal, telle que reproduite par le compresseur testé.

Les haut-parleurs ont été excités par la partie passe-haut du passage musical dans un tube à ondes planes progressivement amorti [1]. Trois niveaux de tension de 14, 20 et 28 V rms ont été testés (niveau). La figure 1 montre un haut-parleur typique (ils étaient tous similaires) et les niveaux de produits de distorsion harmonique totale trouvés aux trois niveaux de tension. Le signal filtré passe-haut a été égalisé avec une amplification des hautes fréquences de 6 dB par octave au-dessus de 2 kHz mise en œuvre sous la forme d'un filtre FIR à 21 prises (figure 2). Cette égalisation, identique pour tous les haut-parleurs, est nécessaire pour compenser l'atténuation de masse qui se produit dans les haut-parleurs de compression. Grâce à cette égalisation, la réponse en fréquence linéaire de tous les haut-parleurs de compression sur le tube à ondes planes était raisonnablement plate et raisonnablement uniforme entre les haut-parleurs, dans la plage de fréquences utile.

La partie passe-haut étant retardée par rapport à la partie passe-bas (en raison du temps de propagation entre le haut-parleur et le microphone), le stimulus final a été créé en normalisant les deux parties et en les additionnant après avoir retardé la partie passe-bas. Les niveaux de retard et de normalisation ont été déterminés en envoyant du bruit via le canal passe-bas et le haut-parleur de compression du tube à ondes planes. En corrélant l'entrée et la sortie, le retard est déterminé comme le point de corrélation maximale. L'adaptation du niveau du signal de bruit est également très simple en examinant simplement le spectre total du signal de bruit recombinaison. Un ajustement final du retard, dû aux différentes réponses en phase des haut-parleurs, a été effectué afin d'obtenir une transition fluide des signaux au point de croisement.

En conséquence, les stimuli obtenus ne contenaient que les modifications apportées aux pilotes de compression, tous les autres paramètres des stimuli étant maintenus constants.

Avec cette procédure, les seules différences restantes entre les neuf stimuli étaient :

- Petites différences de réponse en fréquence linéaire d'un pilote à l'autre (différences de source)
- Contenu de distorsion non linéaire, au sein d'un même pilote, en fonction du niveau de tension d'entrée (différences de niveau).

Il convient de noter que ces dispositifs ne sont équipés ni de pavillon ni de guide d'ondes, car ce n'était pas l'objet de l'étude. Dans un système complet, le pavillon et l'adaptation haut-parleur-pavillon auraient un effet substantiel sur la qualité perçue de l'ensemble, mais notre objectif était de déterminer la contribution du haut-parleur à la qualité sonore de ce système.

2.3 Sujets

Vingt-sept étudiants ont été recrutés pour l'expérience. Tous les sujets ont réussi un test audiométrique de dépistage à 25 dB HL [3] pour 250, 500, 1 000, 2 000, 4 000 et 8 000 Hz. Tous les sujets ont été rémunérés pour leur participation.

2.4 Protocole de test

Un programme informatique a été écrit en Visual Basic pour faciliter la présentation des stimuli, l'enregistrement des données et le suivi de la stabilité des réponses. Le programme présente d'abord une courte section d'entraînement, où les sujets reçoivent des exemples artificiels accompagnés des notes suggérées, puis le test formel.

Lors du test formel, chaque sujet reçoit un stimulus choisi au hasard et joué du début à la fin (15 secondes). Après la présentation complète, le sujet peut donner une note ou effectuer une analyse A-B directe en temps réel.

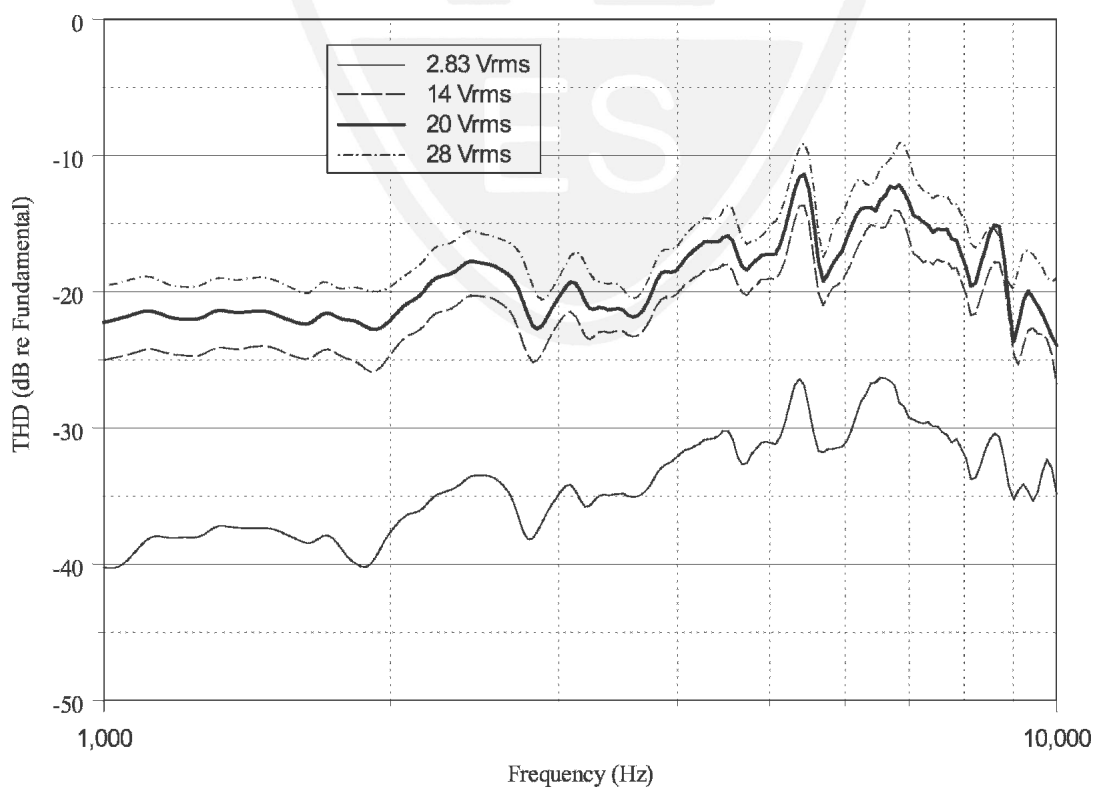


Fig. 1. Distorsion harmonique totale pour un haut-parleur typique.

Comparaison du stimulus de référence et du stimulus test. Les résultats sont enregistrés via une échelle mobile unitaire de 0.

- De imperceptible à 1,0 (nettement perceptible), avec une valeur intermédiaire de à peine perceptible (0,5). Dix niveaux étaient disponibles entre les extrêmes. Après l'évaluation, un nouveau stimulus est présenté et le programme recommence avec un stimulus sélectionné au hasard.

Après la présentation et l'évaluation d'un ensemble de neuf stimuli tests, l'ensemble complet est présenté à nouveau, de manière aléatoire, deux fois de plus. Après trois essais pour chaque stimulus, les données sont vérifiées afin de vérifier la cohérence des réponses. Cela se fait en vérifiant si toutes les réponses se situent dans la plage d'acceptation par rapport à la moyenne des trois essais. La plage d'acceptation est lue par le programme à partir d'un fichier de données externe. Dans cette expérience, elle a été fixée à 0,15 de l'échelle maximale. Cela signifie qu'un seul point de données s'écartant de plus de 0,15 de la moyenne du groupe est rejeté et l'essai est refait sur ce stimulus. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que tous les essais soient stables ou que le sujet ait tenté, sans succès, cinq fois de fournir un ensemble de réponses cohérentes. Ce test de stabilité rejette généralement environ 20 % des sujets tests.

Une fois le test complet effectué, le programme écrit un fichier de données contenant toutes les réponses individuelles suivies des données statistiques pour chaque stimulus.

3 RÉSULTATS

Les notes ont été analysées dans une analyse de variance à mesures répétées à deux facteurs (3 sources par 3 niveaux) en utilisant

un programme statistique appelé SPSS. Les résultats ont indiqué un effet principal significatif pour la source, [$F(2, 25) = 10.934, p < 0,001$]; cependant, aucune différence significative n'a été observée pour le niveau d'effet principal [$F(2, 25) = 1.7, p = 0.203$], ni l'effet d'interaction de la source et du niveau [$F(4, 23) = 0.458, p = 0.765$]. Cela signifie que les sujets ont pu détecter une différence entre les sources (les différents pilotes de compression), mais pas entre les niveaux de lecture des sources. Ainsi, les sujets ont pu détecter des différences de distorsion linéaire, mais pas de distorsion non linéaire, ce qui constitue un résultat très intéressant.

La figure 3 montre les données moyennes selon le niveau et la source. L'axe représente les différentes sources, et l'axe des abscisses représente la note moyenne des sujets. On constate que la variabilité au sein d'un même niveau est très faible et qu'il n'existe aucune cohérence entre les différents facteurs (les variations de niveau ne sont pas statistiquement significatives). Les données indiquent que la source 2 présente une distorsion linéaire significativement plus perceptible que le segment sonore d'origine. Les sources 1 et 3 étaient pratiquement indiscernables l'une de l'autre et peut-être même indiscernables de la référence (voir section 4).

4 OBSERVATIONS GÉNÉRALES

Les sujets utiliseront rarement les valeurs extrêmes de l'échelle numérique autorisée. Il ne faut donc pas s'attendre à une valeur proche de zéro ou de l'unité. Cela signifie que les sources 1 et 3 pourraient bien avoir été « imperceptibles ». Il ne fait aucun doute que la source 2 présente une distorsion linéaire perceptible, et nettement plus importante que les sources 1 et 3. Rétrospectivement, il apparaît clairement que

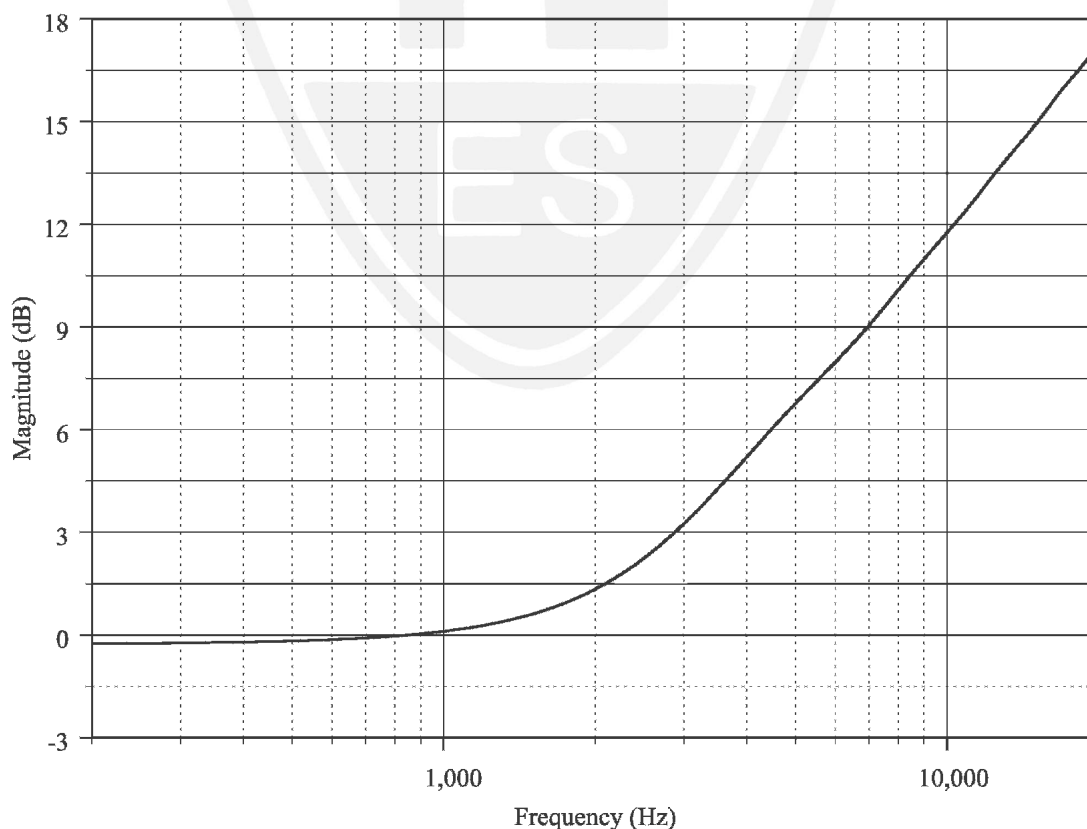


Fig. 2. Réponse en fréquence de la correction de l'atténuation de masse.

L'ajout d'une source fictive, servant en réalité de référence, aurait enrichi l'interprétation des résultats. Il est regrettable que cette possibilité n'ait pas été envisagée au préalable.

5 RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Ces résultats sont importants et intéressants, car l'insignifiance du niveau n'était pas anticipée. Le fait que la distorsion non linéaire dans un moteur de compression ne soit pas un paramètre subjectif significatif est très éclairant et utile. Avant cette étude, on pensait exactement le contraire : la distorsion non linéaire constituait un problème majeur dans les moteurs de compression. Indépendamment des idées reçues sur l'importance auditive de la distorsion non linéaire dans les moteurs de compression, il faut accepter les données : la distorsion non linéaire dans un moteur de compression n'a tout simplement aucun impact sur la qualité sonore.

Cette conclusion concorde avec d'autres publications récentes sur la distorsion non linéaire dans les sous-systèmes de compression à pavillon et guide d'ondes, qui concluent que la quasi-totalité de la distorsion dans ces sous-systèmes est due au guide d'ondes lui-même [2]. Les données présentées ici étayaient considérablement cette hypothèse, certainement d'un point de vue subjectif.

Un résultat significatif de cette étude est qu'il n'y a aucune raison d'envisager un quelconque aspect de la conception d'un haut-parleur de compression sous l'angle de la distorsion non linéaire. En fait, on pourrait avancer que ces résultats indiquent que la distorsion pourrait être considérablement augmentée, afin de réaliser des économies ou de compenser d'autres aspects de la conception (comme la sensibilité), sans impact négatif sur la qualité sonore de l'appareil. Sans accès aux résultats,

Si l'on en croit ce rapport d'ingénierie, la communauté audio aurait certainement pris exception à cette conclusion et s'y serait probablement opposée avec la plus grande fermeté.

6 REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier pour leur généreux soutien B&C Speakers de Florence, en Italie, et GedLee LLC de Novi, au Michigan.

7 RÉFÉRENCES

[1] R. Magalotti, C. Zuccatti et P. Pasini, « Construction d'un tube à ondes planes : aspects expérimentaux et théoriques » *J. Audio Eng. Soc. (Rapports d'ingénierie)*, vol. 47, pp. 596–601 (juillet/août 1999).

[2] A. Voishvillo, « Non-linéarité dans les haut-parleurs de compression : d'où vient la distorsion ? » présenté à la 113e convention de l'Audio Engineering Society, *J. Audio Eng. Soc. (Résumés)*, vol. 50, p. 955 (2002 nov.), document de congrès 5641.

[3] ANSI, S3.6-1996, « Spécification pour les audiomètres », American National Standards Institute, New York (1996).

APPENDICE

Cette expérience utilise un stimulus de référence (le passage musical original non modifié), qui est comparé à divers stimuli tests. Le sujet est invité à évaluer les différences audibles entre les différents stimuli tests et le stimulus de référence. Ce modèle expérimental présente des avantages et des inconvénients. L'un des avantages est la simplification de la tâche.

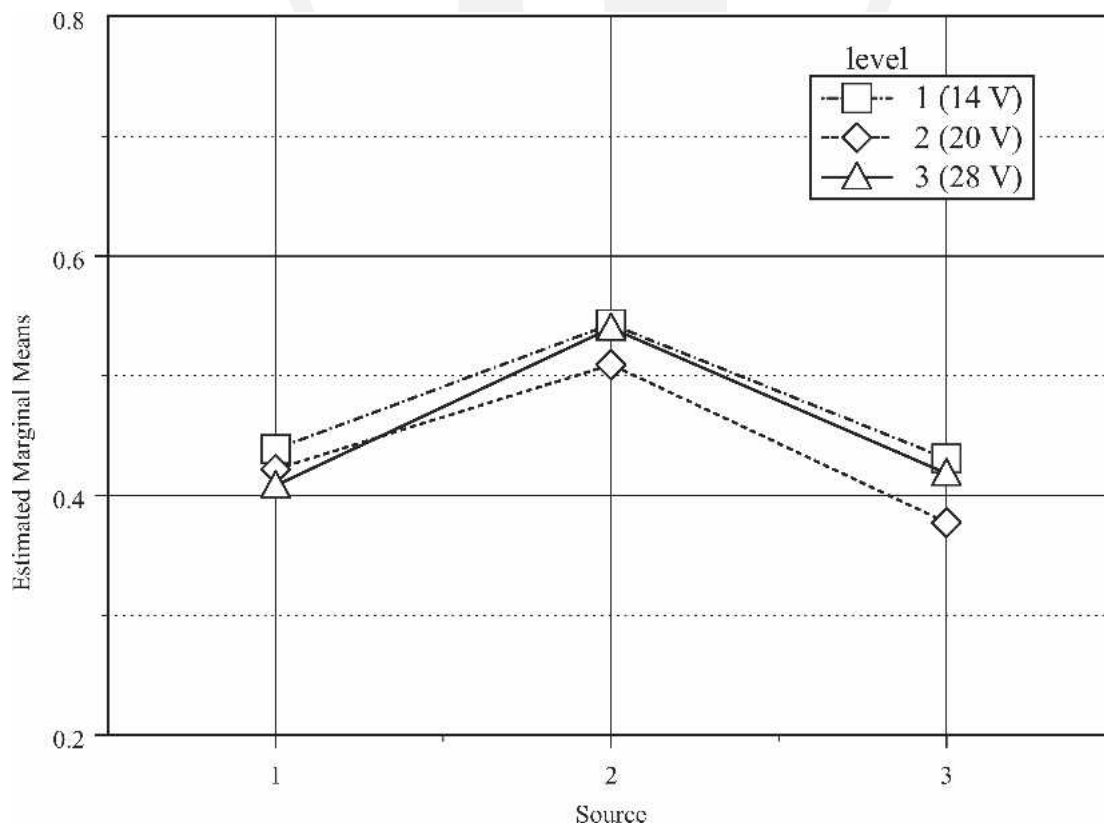


Fig. 3. Note moyenne sur toutes les matières pour la source et le niveau.

Pour réaliser ce test, le sujet dispose en permanence d'une référence pour la comparer au stimulus test : la base de jugement est claire et stable. La variabilité intra-sujet est ainsi minimisée, ce qui conduit à une plus grande stabilité des résultats. L'inconvénient de l'inclusion d'un stimulus de référence dans un plan d'étude est que la question posée est d'identifier la « perceptibilité de la distorsion » et non un « niveau de qualité ». Le plan d'étude de la source de référence sert à déterminer quel conducteur est le plus facilement détecté comme déformé (ou différent), mais il ne permet pas de déterminer quel conducteur sonne le mieux (jugement quantitatif du niveau de qualité). C'est pourquoi l'utilisation d'un stimulus de référence est privilégiée.

Si l'on suppose que toute distorsion du signal musical est indésirable, la question de la détectabilité fournit la réponse complète. Cependant, lorsque des distorsions existent et sont considérées comme inévitables, il est fort possible que les sujets préfèrent le type de distorsion d'un haut-parleur à celui d'un autre, indépendamment de sa détectabilité. Il s'agit d'un point subtil mais important, qui doit être pris en compte dans tout test subjectif où la qualité est une variable.

Si, en revanche, l'objectif avait été d'évaluer la qualité sonore préférée (quelle que soit la source présentant la distorsion la plus audible), ce qui n'était pas le cas ici, un protocole de test différent aurait été privilégié. Parmi les autres protocoles possibles, on trouve le test de comparaison par paires, qui permet d'évaluer les différences de niveau de qualité perçues entre les composantes. Dans ce test, différents stimuli sont présentés aux sujets par paires et il leur est demandé de choisir celui qu'ils préfèrent. Le résultat final de ce test est un classement des préférences, accompagné de sa significativité statistique. L'inconvénient de ce protocole de test est la difficulté d'obtenir des résultats fiables. La variation intra-sujet est souvent un problème dans les classements (intentionnellement ou non, peut-être en raison de la mémoire auditive à court terme) ; par conséquent, le test de comparaison par paires nécessite généralement beaucoup plus de sujets et/ou d'essais pour obtenir un échantillon statistiquement significatif. Elle présente également l'inconvénient qu'un facteur inaudible ou des variables confondantes apparaissent simplement comme une incertitude statistique (bruit) dans les résultats, sans aucune indication quant à la cause profonde de cette incertitude.

LES AUTEURS



ER Geddes

Earl Geddes a obtenu une licence et une maîtrise en physique de l'Université Eastern Michigan et un doctorat en acoustique de l'Université d'État de Pennsylvanie.

Le Dr Geddes a travaillé toute sa carrière dans le secteur de l'audio, principalement chez Ford Motor Company, puis chez Knowles Electronics, principalement dans le domaine des transducteurs et systèmes audio. Il est actuellement président de GedLee LLC, un cabinet de conseil en acoustique basé à Novi, dans le Michigan, et le dirige avec son épouse.

Le Dr Geddes a reçu de nombreux prix universitaires, a acquis plus de 25 brevets et est l'auteur de deux livres. *Transducteurs audio* et *Cinéma maison haut de gamme*, et a publié de nombreux articles. Il a également occupé divers postes à l'AES, notamment vice-président de la région Centre, gouverneur, président des communications de la 91^e Convention, l'AESII a été réviseur, président de séance et a occupé des postes locaux. Il est membre de l'AES depuis 1978 et a été élu fellow de l'AES en 1988.

Lidia Lee a obtenu un doctorat de l'Université de l'Indiana, une maîtrise en audiologie de l'Université Purdue et un diplôme de premier cycle en psychologie expérimentale du Whittier College.

Le Dr Lee est actuellement professeur associé à l'Université Eastern Michigan, à Ypsilanti, dans le Michigan, et est cofondateur de



L.W. Lee

GedLee LLC, Novi, Michigan. Outre l'enseignement, ses recherches portent sur la psychoacoustique et la qualité sonore des prothèses auditives et des systèmes audio. Elle a publié plusieurs articles sur ces sujets et a rédigé des chapitres sur la psychoacoustique. Elle possède plus de 15 ans d'expérience en adaptation, évaluation et recherche d'aides auditives ; elle a également donné de nombreuses conférences sur la préservation de l'audition.

Roberto Magalotti a obtenu son diplôme summa cum laude en physique à l'Université de Bologne, en Italie, en 1994. Sa thèse porte sur la modélisation physique des instruments de musique.

De 1996 à 2001, M. Magalotti a travaillé pour Generalmusic et Music Media Soft en tant que concepteur de systèmes de haut-parleurs professionnels. Il y a mené des recherches dans les domaines de l'optimisation des filtres de filtrage et de la théorie des pavillons de haut-parleurs. En 2000, il a suivi un cours d'acoustique environnementale à l'Université de Ferrare. La même année, il a rejoint B&C Speakers, à Florence, en Italie, où il mène des recherches sur la simulation du comportement des haut-parleurs à signaux forts, les techniques de mesure et les matériaux innovants. Il est membre de l'AES depuis 1997 et est actuellement secrétaire de la section italienne de l'AES.



R. Magalotti