

**CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018**  
**14<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique**



**Méthodes pour l'Estimation de la Perception Sonore d'un  
Équipement de Tête Ostéophonique**

J. Rosier<sup>a</sup>, Y. Pène<sup>a</sup>, J. Dury<sup>a</sup>, V. Zimpfer<sup>b</sup>, G. Blanck<sup>b</sup> et P. Hamery<sup>b</sup>

<sup>a</sup>ELNO, 43 rue Michel Carré, 95100 Argenteuil, France

<sup>b</sup>ISL, 5 rue du général cassagnou, BP70034, 68301 St Louis, France

j.rosier@elno.fr

Depuis un quinzaine d'années, on voit apparaître sur le marché aussi bien Civil que Militaire, une nouvelle catégorie d'équipement de tête audio basée sur la technologie « ostéophonique ». Son principal avantage est d'offrir à l'utilisateur la possibilité d'avoir l'oreille dégagée pour rester alerte à son environnement ou bien se protéger efficacement du bruit à l'aide de bouchons d'oreille tout en communiquant. On constate assez facilement que les performances de ces équipements varient énormément. Ces performances sont intrinsèquement liées à la nature des transducteurs, mais également à leur intégration mécanique dans le casque qui va conditionner leur positionnement et leur force d'appui sur la tête. Il est donc essentiel de pouvoir caractériser les transducteurs solidiens dans des conditions les plus proches de la réalité.

Pour ce faire, cette étude s'intéresse à la perception sonore des équipements de tête « ostéophoniques ». Plus précisément, elle propose une méthode permettant d'évaluer les transducteurs solidiens à partir de mesures audiométriques. Pour un sujet normalement entendant, les audiométries « aérienne » et « solidienne », réalisées avec le casque aérien du banc audiométrique et le casque équipé du transducteur en test, sont utilisées pour déterminer la réponse fréquentielle au seuil d'audition, qui caractérise le rendement du transducteur en conditions réelles d'utilisation. Par cette nouvelle méthode, les réponses fréquentielles de deux transducteurs solidiens différents sont présentées et comparées. On s'intéressera ensuite aux conséquences d'un léger changement de position du transducteur solidien sur la tête, ainsi qu'aux effets liés à l'utilisation de bouchons d'oreille sur cette réponse.

## 1. Contexte

La conduction du son jusqu'à l'oreille interne, par vibration des parties solidiennes du crâne (os et cartilage), est un phénomène physique décrit dans de nombreux travaux de recherche liés à la compréhension des mécanismes de l'Audition. A l'origine du développement d'aides auditives capables de pallier certains troubles de l'audition disponibles sur le marché depuis plusieurs années, la conduction solidienne suscite un intérêt grandissant pour des applications bien plus larges que celles rencontrées dans le Médical. Ainsi, il existe aujourd'hui des bandeaux ostéophoniques qui laissent les oreilles libres et permettent à l'utilisateur d'être alerte à son environnement, ou bien des casques couvrant intégrant des transducteurs solidiens, compatibles de protecteurs type bouchon d'oreille pour une double protection en environnement très fortement bruité.

La qualité audio des casques utilisant la technologie « ostéophonique » est conditionnée par le choix des transducteurs, ainsi que par leur intégration mécanique dans l'équipement de tête. A ce jour, le principal outil de mesure référencé pour calibrer et évaluer les performances de ce type de transducteur est une mastoïde artificielle. Ce coupleur mécanique, conçu pour représenter l'impédance mécanique moyenne de la mastoïde humaine, est très efficace pour calibrer un transducteur et vérifier ses dysfonctionnements éventuels. Malgré tout, il reste peu représentatif des conditions d'utilisation des divers transducteurs solidiens. En effet, pour la plupart des casques « ostéophoniques », les transducteurs solidiens sont placés sur l'os temporal devant l'oreille et non sur la mastoïde de l'utilisateur.

Plusieurs travaux réalisés en Audiologie ont étudié et comparé la transmission des sons par voies solidienne et aérienne, en évaluant notamment les seuils d'audition des chemins osseux, cartilagineux et aérien. Ces études proposent différentes méthodes d'évaluation basées sur la comparaison des niveaux sonores perçus ou bien par annulation des sons aériens par les sons solidiens. Les méthodes proposées tiennent compte du type de transducteur utilisé et/ou de son positionnement sur la tête, mais elles ont un objectif commun qui consiste principalement à évaluer les performances psychoacoustiques des systèmes et qui ne permettent pas de caractériser le transducteur lui-même [1][2][3].

Cette étude propose donc une méthode simple pour évaluer le rendement d'un transducteur solidien intégré dans un casque dans les conditions réelles d'utilisation. Ce travail vient en complément des travaux déjà réalisés sur l'étude des chemins de propagation des sons émis par un vibreur osseux, pour lesquels on montre que les fréquences propagées aux travers des différents chemins sont liées à la nature même du chemin (os, cartilage, liquides...), mais également au transducteur utilisé pour créer les vibrations [4].

Le rendement du transducteur est évalué en déterminant la réponse fréquentielle au seuil d'audition à partir de mesures audiométriques. La suite de cet article, présente tout d'abord le matériel et le protocole de test utilisé pour réaliser les mesures audiométriques. La définition de la réponse fréquentielle au seuil d'audition d'un transducteur solidien est ensuite formalisée.

La méthode ainsi proposée sera finalement utilisée pour :

- Déterminer et comparer la réponse fréquentielle moyenne de deux transducteurs solidiens différents
- Evaluer l'effet sur la perception sonore d'un léger changement de position du transducteur sur le crâne
- Comparer l'effet d'occlusion de l'oreille lorsque chaque transducteur est utilisé

## 2. Matériels et Protocole

### 2.1. Casques tests

Pour réaliser cette étude, nous avons choisi deux transducteurs solidiens de technologie différente : le transducteur n°1 est de type magnétique, tandis que le transducteur n°2 est issu d'une technologie électrodynamique. Ces transducteurs sont intégrés dans des équipements de tête qui permettent de maintenir ces derniers sur le devant des oreilles au niveau de l'os temporal. Les casques tests sont alors connectés au banc audiométrique, pour déterminer les réponses fréquentielles au seuil d'audition de chaque système.

### 2.2. Audiomètre

Le système de mesure utilisé est un audiomètre *Madsen Astera 2* de GN OTOMETRICS. Ce dernier est accompagné d'un casque aérien de référence qui sera utilisé pour déterminer les seuils d'audition aériens des sujets testés. Les audiométries sont réalisées selon la méthode tonale de Békésy : dès que le sujet perçoit un son, il appuie sur le bouton du banc audiométrique et le maintient enfoncé

jusqu'à ce qu'il n'entende plus le son. Le seuil d'audition correspond alors à la médiane entre le seuil montant et le seuil descendant.

Pour les audiométries à conduction solidienne, les deux casques tests sont branchés volontairement sur la même sortie que celle du casque aérien de référence et non à la sortie ostéophonique de l'appareil. En effet, cette seconde sortie est calibrée pour un transducteur osseux de référence, qui se place sur le front. Par conséquent, l'amplification apportée par cette sortie entraîne des niveaux sonores trop élevés pour les transducteurs solidiens testés.

### 2.3. Protocole

Pour réaliser les audiométries, les sujets sont placés dans une chambre sourde. Chaque sujet effectue 5 tests en utilisant le casque aérien de référence, les deux casques test à conduction solidienne, ainsi que des bouchons d'oreille. Les seuils audiométriques sont obtenus pour les configurations présentées ci-dessous:

- **Test 1** : audiométrie réalisée avec le casque aérien de référence
- **Test 2**: audiométrie réalisée avec le casque test intégrant le transducteur n°1 seul
- **Test 3**: audiométrie réalisée avec le casque test intégrant le transducteur n°1 et des bouchons d'oreille
- **Test 4** : audiométrie réalisée avec le casque test intégrant le transducteur n°2 seul
- **Test 5** : audiométrie réalisée avec le casque test intégrant le transducteur n°2 et des bouchons d'oreille

Le test 1 permet d'obtenir l'audiométrie de référence du sujet. Il contient toutes les informations sur ses capacités auditives. Les tests 3 et 5 sont réalisés directement après les tests 2 et 4 pour ne pas modifier la position du transducteur solidien sur la tête du sujet.

### 2.4. Définition de la Réponse fréquentielle au seuil d'audition

Les audiométries mesurées avec les différents casques audio permettent de déterminer la réponse fréquentielle au seuil d'audition  $H$  de chaque transducteur, dont l'expression est donnée par l'équation suivante :

$$H_{(en\ dB)} = N_{s(en\ dB)} - A_{1(en\ dB)} - A_{2(en\ dB)} \quad (1)$$

$N_s$  est le niveau sonore en dB pour un seuil d'audition relatif à la courbe d'iso-sonie de Fletcher & Munson. Les valeurs de  $N_s$  sont données dans le tableau [1].

**Tableau 1:** Niveau sonore  $N_s$  en dB pour avoir le seuil d'audition à partir de la courbe d'iso-sonie de Fletcher & Munson.

125	250	500	1k	2k	4k	8k
22	12	8	6	2	-3	17

$A_1$  est la différence des audiométries obtenues avec le casque aérien de référence et le casque solidien testé. Ce terme

permet d'éliminer les pertes auditives éventuelles de chaque sujet.

$A_2$  est un terme correctif lié à l'amplification apportée par l'audiomètre. Les valeurs mesurées pour  $A_2$  sont données dans le tableau [2].

**Tableau 2:** Niveau d'amplification  $A_2$  en dB de la sortie de l'audiomètre pour avoir le seuil d'audition (référence prise à 250 Hz)

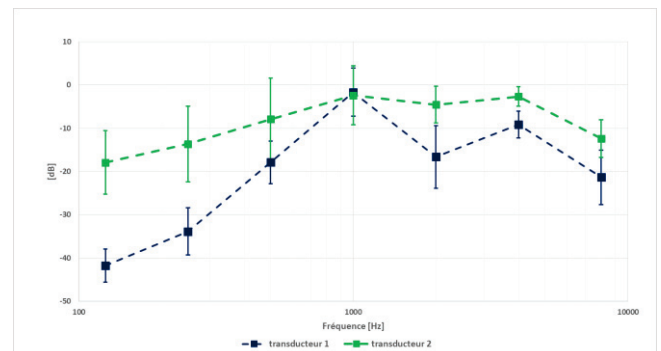
125	250	500	1k	2k	4k	8k
20	0	-14,7	-20	-15,6	-16,7	-4,4

## 3. Résultats

Cette partie décrit les résultats obtenus pour des tests d'audiométrie réalisés sur 7 sujets différents : 5 hommes et 2 femmes.

### 3.1. Réponse fréquentielle des transducteurs

La réponse au seuil d'audition  $H$  des transducteurs solidiens est estimée à l'aide de l'équation 1. La figure 2 représente les réponses fréquentielles moyennes obtenues pour les deux transducteurs.



**Figure 2:** Réponses fréquentielles au seuil d'audition moyennes et écart-type pour les transducteurs n°1 et n°2

La comparaison des deux réponses fréquentielles, montrent que le transducteur n°2 a un rendement plus large bande que le transducteur n°1. Ce résultat peut s'expliquer par la nature même des transducteurs. En effet, le transducteur n°2 est issu d'une technologie électrodynamique qui en règle générale permet de concevoir des haut-parleurs avec une réponse plus plate que la technologie magnétique.

Dans le cas du transducteur n°1, les réponses en fréquence solidienne et aérienne ont été mesurées à l'aide d'une mastoïde artificielle type B&K 4930 et d'un microphone de mesure type B&K 4938 placé à 10 cm. Ces réponses sont présentées sur la figure 3.

La comparaison entre la réponse fréquentielle obtenue au seuil d'audition  $H$  et la réponse aérienne mesurée avec le microphone, montre que l'on retrouve bien la fréquence de résonance à 4000 Hz, caractéristique du transducteur n°1. En revanche, les fréquences de résonance mesurées sur la

mastoïde artificielle sont différentes de celles obtenues pour *H*. Cette différence peut s'expliquer par le positionnement et la force d'appui des transducteurs sur la tête. En effet, comme le montre la figure 4, le transducteur ne met pas directement en vibration la mastoïde humaine. L'impédance mécanique de la surface en contact avec le transducteur peut donc être différente de celle de la mastoïde artificielle. De plus, les mesures réalisées sur mastoïde artificielle sont obtenues avec une force d'appui de 5,4 N qui n'est pas représentative de la force d'appui des transducteurs en conditions réelles.

La comparaison entre les réponses solidiennes obtenues sur mastoïde artificielle et sur les 7 sujets testés, montre clairement que la mastoïde artificielle est un outil de mesure peu adapté à la caractérisation des transducteurs solidiens et plus généralement des équipements de tête « ostéophoniques ».

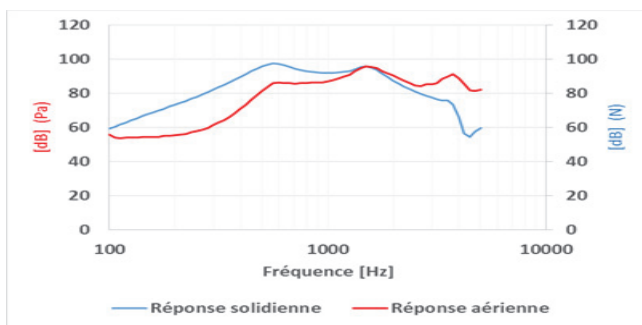


Figure 3: Réponse en fréquence du transducteur n°1 sur mastoïde artificielle (réponse solidienne) et niveau sonore mesuré à 10cm (réponse aérienne)

### 3.2. Effet de la position sur le transducteur

Pour évaluer l'effet de la position du transducteur sur son rendement, le test 2 a été réalisé pour deux positions différentes du transducteur, éloignées volontairement de d'environ 1 cm (figure 4).

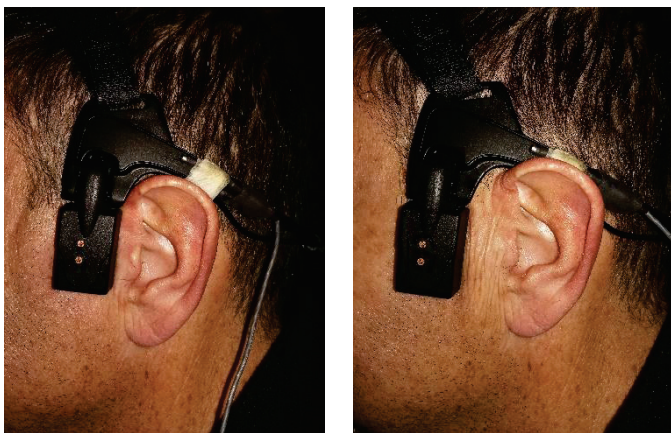


Figure 4: Position différente du transducteur n°1 pour les mesures de seuil d'audition (position de référence à gauche)

Comme le montre la réponse aérienne présentée sur la figure 3, le transducteur n°1 émet en aérien avec un rendement maximale autour de 4000 Hz. On vérifie dans un

premier temps, l'impact du changement de position du transducteur, sur le niveau aérien arrivant à l'entrée du conduit auditif. Pour cela, les fonctions de transfert entre un microphone de mesure placé à l'entrée du conduit auditif du sujet et le transducteur ont été mesurées pour les deux positions. Les résultats sont présentés sur la figure 5.

La faible différence entre les deux fonctions de transfert montre qu'un positionnement du transducteur éloigné de sa position de référence, n'a pas d'impact sur le niveau sonore arrivant à l'oreille. Les différences obtenues pour les deux audiométries solidiennes de ces deux positions viendront donc d'un changement du niveau sonore de la voie solidienne.

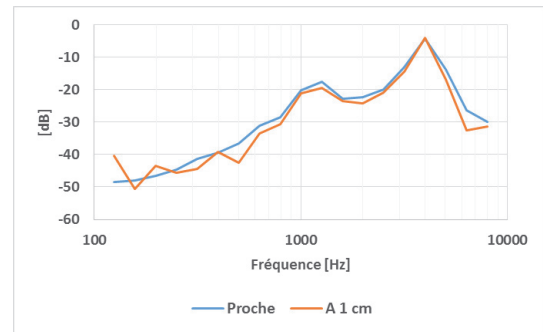


Figure 5: Réponse du chemin aérien/aérien du transducteur 1 pour deux positions différentes

La figure 6 présente la différence moyenne entre les réponses fréquentielles *H* obtenues pour 2 positions du transducteur solidien n°1.

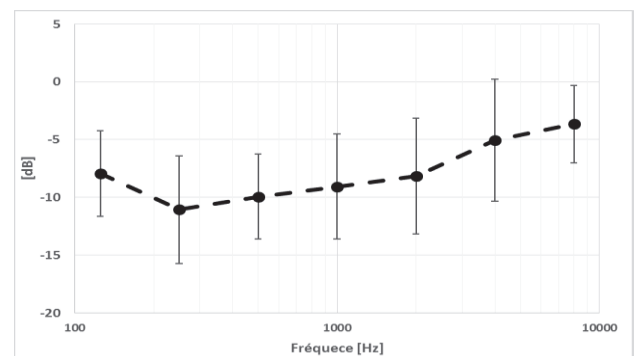


Figure 6: Différence moyenne et écart type entre le seuil audition obtenue proche et 1 cm plus loin de d'oreille avec le transducteur 1 à conduction osseuse.

Ce résultat montre que le rendement diminue lorsque le transducteur s'éloigne du tragus de l'oreille. Cette différence est moins prononcée dans les hautes fréquences et peut s'expliquer par le fait qu'on retrouve la contribution aérienne due au rayonnement du transducteur dans l'air.

Ainsi, un changement de position du transducteur de l'ordre du cm peut modifier de façon conséquente le niveau sonore issu de la conduction solidienne, sans modifier la contribution liée à la conduction aérienne.

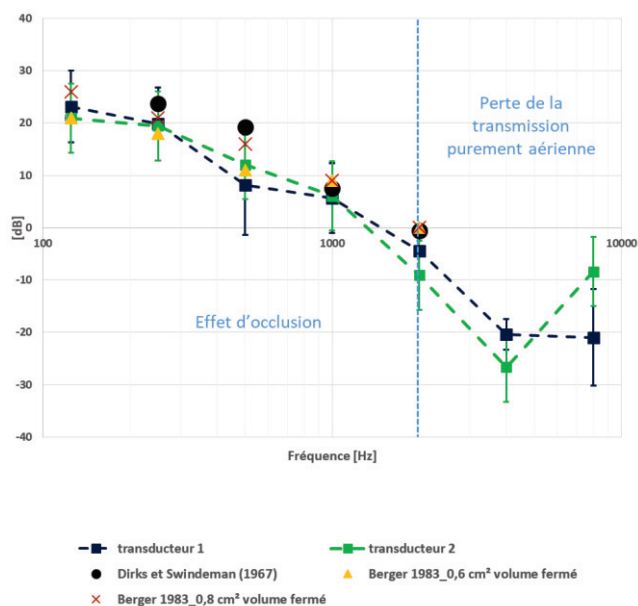
Enfin, la dispersion inter-individus peut s'expliquer par le fait qu'en modifiant le positionnement du transducteur on modifie également sa force d'appui.



### 3.3. Effet occlusion

L'utilisation de bouchons d'oreille avec les équipements « ostéophoniques » permet de s'isoler du bruit extérieur tout en communiquant. Les tests audiométriques réalisés avec ce type de protecteurs (test n°3 et test n°5) permettent de comparer les effets des bouchons sur les seuils d'audition solidiens pour un transducteur donné.

La figure 8 présente la différence moyenne entre les réponses fréquentielles  $H$  obtenues avec et sans bouchon pour le transducteur n°1 et le transducteur n°2.



**Figure 8:** Différence moyenne entre le seuil d'audition obtenue avec et sans bouchon d'oreille pour les transducteurs 1 et transducteurs 2. Comparaison avec les mesures de l'effet d'occlusion réalisées par Dirks et Swindeman (1967) [5] et Berger (1983) [6]

On constate alors que l'effet du bouchon sur la mesure du seuil audition solidien ne dépend pas du transducteur. En basse fréquence une augmentation du seuil audition est constatée. Cette augmentation est due à l'effet d'occlusion. La comparaison avec les courbes obtenues par Dirks et Swindeman (1967) [5] et par Berger (1983) [6] montrent que l'amplification mesurée dans cette étude est d'ordre équivalent. En hautes fréquences on constate une diminution du seuil lorsqu'on porte un bouchon d'oreille. Cela conforte le fait que pour les fréquences supérieures à 2000 Hz, le son arrivant jusqu'à l'oreille interne du sujet est principalement issu du rayonnement aérien du transducteur.

Les dispersions obtenues montrent que la réponse d'un transducteur solidien est différente selon la morphologie du sujet et que l'effet d'occlusion va également dépendre de la façon dont il va porter le bouchon.

## 4. Conclusion

Cette étude propose une méthode d'évaluation des transducteurs solidiens utilisés dans les équipements de tête « ostéophoniques ». La réponse fréquentielle au seuil

d'audition est déterminée à partir de mesures audiométriques. Cette réponse est une mesure du rendement du transducteur en conditions réelles d'utilisation, qui tient compte de la nature même du transducteur, de son intégration mécanique dans le casque et de son positionnement sur la tête.

Deux transducteurs solidiens de technologies différentes, intégrés dans deux casques audio sont étudiés. L'évaluation de leur performance est réalisée en mesurant les seuils d'audition aérien et solidien pour un groupe de 7 sujets.

La comparaison des réponses fréquentielles des deux transducteurs, met en évidence les caractéristiques de chacun et montrent que le transducteur n°2 possède un rendement plus large bande que le transducteur n°1.

Par cette méthode, on constate que pour un même transducteur solidien placé à deux positions légèrement différentes de l'ordre du cm, on réduit fortement le niveau sonore lié à la transmission solidienne. Pour cette distance, le rayonnement du transducteur dans l'air reste inchangé.

Enfin, la comparaison des seuils audiométriques obtenus pour les deux transducteurs solidiens, avec et sans bouchon, montrent qu'il n'y a aucune différence entre les deux transducteurs et que seul l'effet d'occlusion intervient, entraînant une amplification des fréquences inférieures à 2000 Hz.

La Réponse fréquentielle au seuil d'audition d'un transducteur solidien est un outil qui offre de nouvelles possibilités pour intégrer ce type de transducteur de manière optimale dans les équipements de tête. Des tests complémentaires sur un plus grand nombre de sujets et avec d'autres transducteurs solidiens seront réalisés pour consolider les résultats obtenus lors de cette étude.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tous les auditeurs volontaires qui ont participé aux différents tests.

## Références

- [1] Nishimura, H. Hosoi, R. Miyamae, R. Shimokura, T. Yamanaka, T. Kitahara, H. Levitt, «Cartilage Conduction Is Characterized by Vibrations of Cartilaginous Portion of the ear canal», PLoS One. 2015, T.
- [2] Khanna SM, Tonndorf J, Queller J, "Mechanical parameters of hearing by bone conduction", The Journal of the Acoustical Society of America 60, 139 (1976),
- [3] S. Stenfelt, B. Håkansson, "Air versus bone conduction: an equal loudness investigation", Hear Res, 167 (2002), pp. 1-12,
- [4] V. Zimpfer, P. Hamery, G. Blanck, J. Rosier, « Etude des chemins acoustiques prépondérants lors d'une écoute avec un émetteur ostéophonique », Congrès Français d'Acoustique, Le Mans, FR, 11-15 avril 2016, pp. 2683-2689

- [5] D. Dirks & J.G. Swindeman, The variability of occluded and unoccluded bone-conduction thresholds, *J. of Speech and Hearing Res.*, 10, 232-249, (1967).
- [6] E. H. Berger and J. E. Kerivan, "Influence of physiological noise and the occlusion effect on the measurement of real-ear attenuation at threshold", *J. Acoust. Soc. Am.* 74, 81-94 (1983).