

# CFA/VISHNO 2016

## Etude des chemins acoustiques prépondérants lors d'une écoute avec un émetteur ostéophonique

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

<sup>a</sup>ISL, 5 rue du Général Cassagnou, 68301 Saint Louis, France

<sup>b</sup>ElnO, 43 Rue Michel Carré, 95100 Argenteuil, France

veronique.zimpfer@isl.eu



LE MANS

L'utilisation d'un émetteur ostéophonique dans la conception d'un équipement de communication constitue une évolution technologique importante et efficace dans des environnements bruyants. Compatible avec l'utilisation d'une protection auditive, cette technologie, contrairement au comportement des émetteurs audio conventionnels, n'est pas encore entièrement maîtrisée. En effet, la réelle contribution des différents chemins acoustiques n'est pas complètement quantifiée. Plusieurs chemins sont possibles : un chemin purement osseux, un chemin entièrement aérien ou bien une combinaison des deux voies. L'objectif de cette étude est d'évaluer la part de chacun de ces chemins acoustiques. Dans un premier temps les fonctions de transfert entre l'écouteur ostéophonique et un dispositif microphonique placé dans le conduit auditif de l'auditeur sont mesurées pour différentes configurations. Puis, afin d'enrichir ces données objectives, des tests subjectifs pour quelques fréquences (fréquences centrales des bandes d'octaves) sur différents sujets sont également réalisés. Ces essais devraient permettre de déterminer quel est le chemin prépondérant pour des gammes de fréquences allant de 125 à 4000 Hz.

## 1 Introduction / Contexte

L'environnement sonore que nous percevons emprunte généralement la voie aérienne : vibrations de l'air extérieur, vibrations de l'air dans le conduit auditif, mise en vibration du tympan, des osselets et de la platine de l'étrier, déplacements volumiques et variations de pression dans les liquides de l'oreille interne, et finalement stimulation de l'organe sensoriel. Il est cependant possible de réaliser une stimulation auditive en générant des vibrations directement sur les os du crâne (par voie osseuse) ou sur le cartilage (par voie cartilagineuse [6]). La stimulation par voie osseuse est très utilisée en clinique à des fins de diagnostic ([1] [2] [3]). Il existe deux formes de conduction par voie osseuse : la conduction osseuse par inertie et la conduction osseuse par compression ([1] [2], [4]). Dans le cas de la conduction osseuse par inertie (pour les fréquences inférieures à 800 Hz), le crâne humain vibre comme un corps rigide. Dans le cas de la conduction par compression (pour les fréquences supérieures à 800 Hz), le crâne se déforme et présente des modes vibratoires plus ou moins complexes.

La distinction entre conduction osseuse ou cartilagineuse et la conduction aérienne n'est cependant pas toujours aisée. En effet, l'application d'un vibreur peut provoquer des variations de pression dans le conduit auditif et stimuler la cochlée par voie aérienne. Si le vibreur est en contact avec le cartilage du pavillon auditif ou du conduit auditif, il y a rayonnement « vibro-acoustique » de ces structures vers l'air contenu dans le conduit (voie cartilagineuse), et audition par voie aérienne. Ce phénomène est particulièrement net aux fréquences inférieures à 2000 Hz et est à l'origine d'un renforcement important de la sensation sonore amenée par voie osseuse lorsque l'entrée du conduit auditif est obstruée comme le montre le tableau 1.

Tableau 1 : Effet de l'occlusion du conduit sur les seuils d'audition par voie osseuse, selon Dirks et Swindeman (1967) [4].

	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Effet d'occlusion	23,7 dB	19,3 dB	7,5 dB	- 0,6 dB

La figure 1 illustre deux transducteurs permettant une conduction osseuse ou cartilagineuse. Les vibreurs osseux utilisés pour l'audiométrie sont le plus souvent constitués d'une petite masse qui vient au contact de la peau et qui est mise en mouvement par un électroaimant. Les transducteurs

cartilagineux sont souvent composés d'un piézoélectrique bimorphe recouvert d'un matériel élastique qui élargit le domaine spectral de la vibration transmise [6].

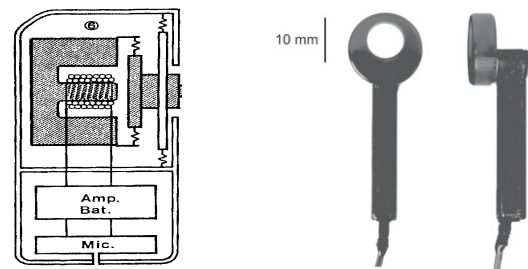


Figure 1 : Schéma (à gauche) d'un vibreur osseux et photographie (à droite) d'un transducteur cartilagineux

Dans le cadre de l'étude présentée dans ce papier, nous nous sommes intéressés uniquement à un vibreur osseux appelé écouteur ostéophonique. Deux écouteurs sont insérés sur une armature afin de réaliser un bandeau. Les écouteurs se placent entre l'oreille et la pommette comme le montre la figure 2.



Figure 2 : Bandeau communicant placé sur une tête (fictive) avec deux écouteurs ostéophoniques.

L'objectif de cette étude est de mieux comprendre la réalité des chemins empruntés par les ondes sonores émises par ces écouteurs ostéophoniques. Dans la littérature [5] [7] on trouve différentes explications pour ces chemins de transmission :

- Les vibrations irradient le canal auditif, créant ainsi une onde aérienne dans le conduit auditif,
- Les vibrations sont transmises par les os à l'organe sensoriel soit par compression soit par effet d'inertie.

Un rayonnement aérien par l'extérieur du vibreur osseux semble également exister, d'où la création d'une

onde aérienne. La figure 3 illustre les trois chemins possibles de l'onde sonore émise par les écouteurs ostéophoniques (mêmes chemins que pour le transducteur cartilagineux décrits par Nishimura [8]) :

- Chemin aérien/aérien (noté chemin 1) qui est la conséquence des vibrations extérieures du vibrateur osseux (en rouge),
- Chemin ostéo/aérien (noté chemin 2) qui correspond aux vibrations transmises dans le conduit auditif (en vert),
- Chemin ostéo/ostéo (noté chemin 3) qui est la résultante de la compression des os du crâne (en bleu).

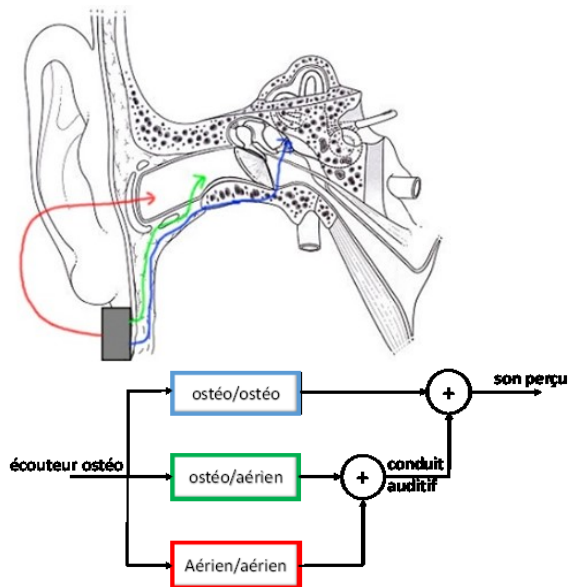


Figure 3 : Représentation des différents chemins de transmission d'un son émis par un écouteur ostéophonique.

Cette étude, fondée sur différents tests, a pour but d'essayer de quantifier les chemins acoustiques entre l'écouteur ostéophonique et l'oreille interne en mettant en évidence le chemin prépondérant.

## 2 Différence oreille ouverte et oreille fermée

L'idée conductrice de ce premier test est d'utiliser un bouchon d'oreille afin de supprimer le chemin 1 tout en amplifiant le chemin 2 grâce à l'effet d'occlusion surtout dans le domaine des basses fréquences (voir tableau 1). Ainsi, en plaçant le bouchon dans une seule oreille à la fois, et en émettant le même signal sonore sur chaque oreille :

- si le son de l'oreille ouverte est perçu plus fort, alors le chemin 1 prédomine,
- si le son de l'oreille fermée est perçu plus fort, alors le chemin 2 avec l'effet d'occlusion prédomine.

### 2.1 Matériels et méthodes

Lors du test, deux sons identiques de même niveau et de même fréquence sont émis successivement sur chacune des oreilles par le bandeau ostéophonique dans un ordre aléatoire et séparés par une pause. L'objectif du participant

est de déterminer lequel des deux sons est perçu le plus fort, premier son (son 1) ou second son (son 2) entendu. Pour ce faire il répond directement via une interface graphique. A la moitié du test, le sujet change le bouchon de côté et termine le test.

Dans tous les cas l'auditeur doit répondre et déterminer lequel des deux sons est, selon lui, le plus fort, même s'il pense que les deux sons sont de niveaux identiques (test à choix forcé).

Le test s'est déroulé en deux scénarios ; dans les deux cas 20 sons sont émis par fréquences (10 sons avec l'oreille droite obstruée et 10 avec la gauche obstruée). Ce qui change d'un scénario à l'autre est la valeur des fréquences :

- une octave entre chaque fréquence pour le premier scénario (125, 250, 500, 1000, 2000 et 4000 Hz),
- un tiers d'octave entre chaque fréquence pour le deuxième scénario (500, 630 800, 1000, 1250, 1600 et 2000 Hz).

Les stimuli utilisés pour ce test sont des signaux sinusoïdaux de différentes fréquences fenêtrés par une fenêtre de Welch de 300 ms. Dans chacun des cas les signaux sont identiques et émis successivement sur les deux oreilles avec une pause de 750 ms.

### 2.2 Résultats

Vingt-sept sujets âgés de 22 à 57 ans (moyenne d'âge de 39 ans) ont participé aux essais avec le premier scénario, mais seulement vingt d'entre eux, âgés de 24 à 53 ans (moyenne d'âge de 40 ans), ont participé également au deuxième scénario. Tous les auditeurs ont déclaré ne pas avoir de problème auditif.

La Figure 4 donne les résultats pour l'ensemble des deux scénarios en indiquant le nombre moyen des sons ressentis les plus forts selon la condition d'écoute (oreille fermée ou ouverte) pour chaque fréquence (20 sons par fréquence). Pour chaque fréquence une analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée afin de déterminer si la différence entre les deux conditions d'écoute est significative ou non. En basses fréquences et en hautes fréquences les différences entre l'oreille ouverte et l'oreille fermée sont très significatives. Pour la fréquence médium 1600 Hz il n'y a pas de différence significative entre les deux conditions d'écoute. A cette fréquence nous remarquons une inversion de la tendance. En effet, le son est perçu plus fort du côté de l'oreille fermée en basses fréquences et du côté de l'oreille ouverte en hautes fréquences.

Pour une fréquence donnée, si l'auditeur répond au moins 15 fois sur l'une des deux conditions, pour les 20 comparaisons, c'est qu'il est sûr d'entendre plus fort le son pour cette condition d'écoute. Dans le cas contraire on peut supposer que les auditeurs doutent. La Figure 5 représente le pourcentage d'auditeurs qui sont sûrs que le son est perçu plus fort sur l'oreille fermée ou l'oreille ouverte. Elle donne également le pourcentage de personnes qui doutent. Sur ce graphique, on constate que pour la fréquence 1600 Hz, 85 % des auditeurs ne savent pas répondre avec quelle condition d'écoute ils entendent le plus fort. Sur cette même figure on observe également qu'à partir de 1600 Hz la tendance s'inverse : le nombre de personnes qui sont sûres d'entendre plus fort avec l'oreille ouverte augmente

fortement et le nombre de personnes qui sont sûres avec l'oreille fermée est quasi nul. A partir de 630 Hz le nombre de personnes qui doutent augmente pour atteindre son maximum à 1600 Hz. On peut donc supposer que le changement s'effectue, en fonction des sujets, entre 1000 Hz et 2000 Hz. Le nombre de personnes qui doutent ne diminue pas pour 4000 Hz (encore 40%). Certains sujets (âgés de plus de 45 ans) ont déclaré avoir du mal à entendre le 4000 Hz. Si on enlève les huit auditeurs âgés de plus de 45 ans, le taux de personnes qui doutent à 4000 Hz chute à 26% et le taux qui sont sûrs d'entendre sur l'oreille ouverte est de 74 %.

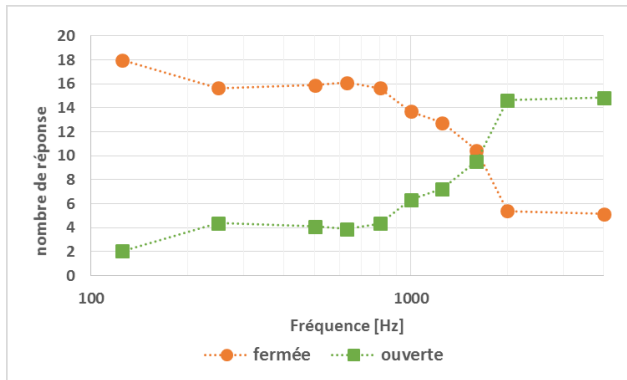


Figure 4 : Nombre moyen (sur 20 comparaisons) de sons perçus plus forts suivant la condition d'écoute (oreille fermée ou ouverte) en fonction des différentes fréquences.

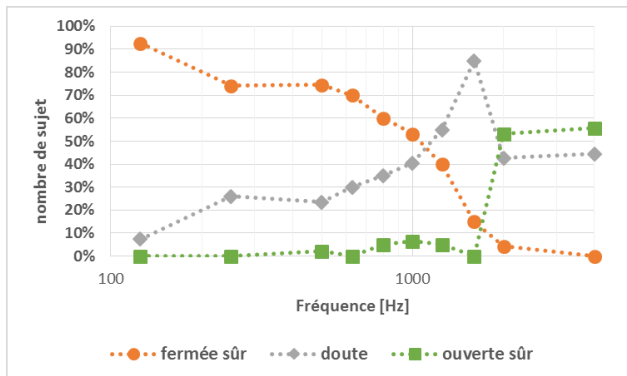


Figure 5 : Pourcentage de participants qui sont sûrs d'entendre plus fort sur une des deux conditions d'écoute et le pourcentage de participants qui doutent.

### 3 Mesure de fonctions de transfert

Les tests subjectifs décrits dans le paragraphe 4 visent à comparer le niveau sonore perçu entre deux sons, l'un émis par un haut-parleur devant l'oreille et l'autre par l'écouteur ostéophonique. Pour ces tests, les deux signaux sonores doivent avoir le même niveau dans le conduit auditif. Ce niveau sonore étant la somme de la contribution du chemin 1 et du chemin 2, il faut calculer le gain à appliquer à l'ostéophone permettant d'obtenir un niveau identique à celui généré par le haut-parleur dans le conduit auditif. Cette mesure de gain passe par l'enregistrement et la comparaison de deux fonctions de transfert :

- la fonction de transfert entre le haut-parleur et un microphone placé dans le conduit auditif,

- la fonction de transfert entre l'écouteur ostéophonique et le même microphone placé dans le conduit.

### 3.1 Matériels et méthodes

#### 3.1.1 Matériels

Le dispositif de test se compose principalement de trois éléments : l'ostéophone, le casque ouvert (voir Figure 7) et un dispositif microphonique pouvant se placer dans le conduit auditif sans l'obstruer. Ces trois éléments sont portés simultanément par chacun des participants.

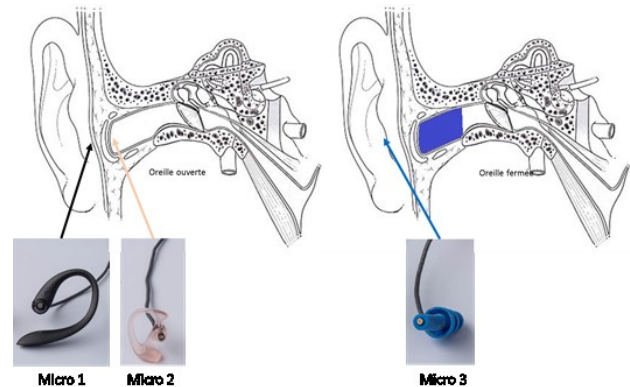


Figure 6 : Les trois dispositifs microphoniques avec leur position utilisés pour la mesure des fonctions de transfert.



Figure 7 : Dispositif "casque audio ouvert" permettant d'émettre un son près de l'oreille sans l'isoler et qui suit les mouvements de la tête.

Trois dispositifs microphoniques ont été utilisés (voir Figure 6). Le micro 1 permet de mesurer le niveau sonore à l'entrée du conduit auditif et le micro 2 permet une mesure plus proche de l'intérieur de celui-ci. Le micro 3 permet de mesurer la fonction de transfert de la contribution aérienne issue directement de l'écouteur ostéophonique, puisque l'oreille est obstruée par le bouchon. Ces trois montages microphoniques utilisent tous les trois un microphone miniature Knowles de la série FG.

Le « casque audio ouvert », illustré sur la Figure 7, est un dispositif permettant d'émettre une onde aérienne toujours à la même distance (~3cm) entre la source (haut-parleur) et l'oreille du sujet. Il permet également de suivre

les mouvements de la tête de l'auditeur lors de la mesure. Ce dispositif garantit une position de la source sonore par rapport à l'oreille toujours identique sans l'obstruer.

### 3.1.2 Stimuli

Les mesures des fonctions de transfert ont été estimées pour seulement 12 fréquences (125, 250, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150 et 4000 Hz). Pour chaque fréquence, 200 périodes sont émises à l'aide d'une carte son (voie gauche pour l'écouteur ostéophonique et voie droite pour le casque ouvert).

### 3.1.3 Protocole

L'auditeur s'installe dans une cabine d'audiométrie. Il met le casque ouvert, l'ostéophone, et un des trois microphones dans l'oreille droite. Quand il est prêt, il appuie sur un bouton qui génère les sources sonores dans l'ostéophone et dans le casque ouvert. La mesure des deux fonctions de transfert se fait à la suite, fréquence par fréquence. Pour chaque microphone, deux fonctions de transfert sont mesurées du côté droit. Avec le troisième microphone, la fonction de transfert entre le casque ouvert et le microphone n'a pas été mesurée.

## 3.2 Résultats

Vingt-trois sujets âgés de 24 ans à 57 ans ont participé aux mesures des fonctions de transfert. La Figure 8 représente les fonctions de transfert moyennes entre l'écouteur ostéophonique et l'un des différents microphones. La courbe noire (pointillés) est la fonction de transfert mesurée sur la tête artificielle de l'ISL en utilisant le micro 1 (tour d'oreille). Cette fonction de transfert correspond à la partie aérienne de l'écouteur ostéophonique. On constate sur cette figure qu'on ne mesure pas la même fonction de transfert entre le micro 1 et le micro 2. Le micro 2 se situe plus proche de l'intérieur de l'oreille que le micro 1 et enregistre un niveau supérieur sur l'ensemble des fréquences jusqu'à 3000 Hz. On a pu observer une forte disparité (un fort écart type) des fonctions de transfert en fonction du sujet.

La fonction de transfert mesurée par le micro 3 correspond au rayonnement de l'écouteur ostéophonique dans l'air. Le niveau sonore mesuré par le micro 3 est plus faible qu'avec les deux autres sauf en haute fréquence (> 3000 Hz) où les deux microphones (1 et 2) mesurent quasiment le même niveau. En effet, avec ce microphone l'influence du chemin 2 (ostéo/aérien) est supprimée par la présence du bouchon. Cette courbe montre que pour les hautes fréquences, supérieures à 3000 Hz, le niveau sonore dans le conduit auditif est dû principalement au rayonnement de l'ostéophone dans l'air. Les mesures obtenues avec le micro 3 ressemblent à celles réalisées sur la tête artificielle avec le micro 1 pour les basses fréquences (<1000 Hz). Pour les fréquences supérieures à 100 Hz, la différence observée est due soit à la différence de position entre le micro 1 dans l'oreille et le micro 3 à l'extérieur soit à la différence d'impédance de charge de l'ostéophone.

La Figure 9 représente les fonctions de transfert moyennes entre le casque aérien ouvert et deux microphones. Quel que soit le microphone (micro 1 ou 2), la fonction de transfert mesurée est quasiment la même et semblable à celle mesurée sur la tête artificielle. Pour cette

fonction de transfert l'écart type est plus faible ce qui traduit une faible dispersion interindividuelle.

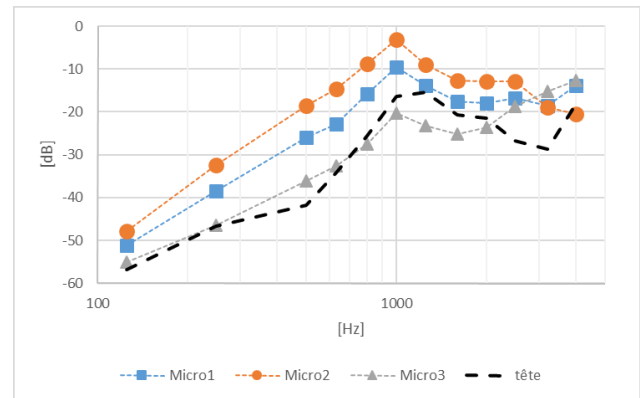


Figure 8 : Fonction de transfert entre l'écouteur ostéophonique et le microphone utilisé.

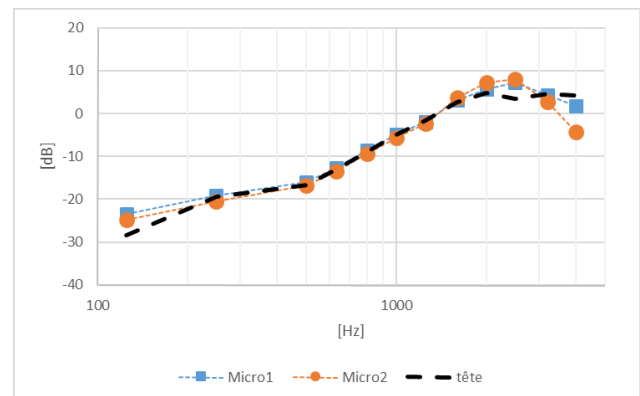


Figure 9 : Fonction de transfert entre le casque audio ouvert et le microphone utilisé.

Afin de vérifier si les deux mesures dans les mêmes conditions (même microphone et même source sonore) sont semblables, la corrélation entre elles, définie par la formule ci-dessous, a été calculée.

$$\text{cor}(M1, M2) = \frac{\text{cov}(M1, M2)^2}{\text{var}(M1) \cdot \text{var}(M2)}$$

Où M1 et M2 représentent les deux mesures de fonction de transfert pour le même sujet avec le même microphone et le même écouteur. La valeur obtenue est comprise entre 0 et 1. Plus une valeur est proche de 1, plus la ressemblance est grande entre les deux mesures.

Tableau 2 : Moyenne et minimum de la corrélation entre les deux mesures réalisées pour un même dispositif.

		Micro1	Micro2	Micro3
Ostéophone	Moyen	0,901	0,914	0,931
	Min	0,731	0,613	0,554
Casque aérien	Moyen	0,984	0,983	
	Min	0,817	0,900	

Le Tableau 2 donne la moyenne et le minimum par microphone et par dispositif audio sur les vingt-trois sujets. On constate que la corrélation est plus importante avec le casque audio ouvert et que peu de différences sont notables entre les microphones. Dans l'ensemble, et à la vue des valeurs de corrélation obtenues (0,91 pour l'ostéophone et 0,98 pour le casque ouvert), ces mesures peuvent être

considérées comme reproductibles (en effet on a obtenu en moyenne une corrélation de 0,91 pour l'écouteur ostéophonique et 0,98 pour le casque audio ouvert).

Pour un signal sonore uniquement aérien émis par le « casque audio ouvert », il n'y a pas de différence entre le niveau sonore mesuré par le miro 1 et celui mesuré par le micro 2. La différence entre les deux microphones observée lors l'émission par l'écouteur ostéophonique est due à l'apport d'une onde aérienne créée par la vibration du conduit auditif qui traduit la contribution du chemin 2. En effet la contribution du chemin 2 sur le niveau sonore mesuré par le micro 2 est plus importante qu'avec micro 1, puisque le micro 1 mesure le signal à l'entrée du conduit et non dans le conduit.

## 4 Comparaison son aérien et son ostéo

Le but de cette partie est de donner les résultats d'une mesure subjective permettant de comparer le niveau sonore perçu entre deux sons. L'un est émis par le casque audio ouvert et l'autre par l'écouteur ostéophonique sachant que ces deux sons devraient produire le même niveau sonore dans le conduit auditif. Si le son perçu est plus fort lorsqu'il est émis par l'écouteur ostéophonique cela indiquera que l'onde solidienne (chemin 3) est non négligeable par rapport aux deux autres chemins.

### 4.1 Matériels et méthodes

Pour ce faire on s'est appuyé sur les résultats des fonctions de transfert mesurées sur vingt-trois sujets et présentées dans le paragraphe précédent. La Figure 10 représente le gain moyen et l'écart type obtenu sur les vingt-trois sujets pour le micro 1 et le micro 2. Lors de l'émission avec l'ostéophone, le niveau sonore dans le conduit auditif (micro2) est plus important qu'à l'entrée de celui-ci (micro1), ce qui impose un gain moyen plus faible avec le micro 2 qu'avec le micro 1. Par contre sur cette figure on constate que l'écart-type du gain est du même ordre de grandeur que la moyenne surtout pour les fréquences médium ([630 Hz – 1600 Hz]). Ce fort écart-type relève d'une forte disparité entre les individus de la fonction de transfert de l'écouteur ostéophonique.

Pour ce test subjectif, le protocole est le même que celui utilisé pour comparer l'oreille ouverte avec l'oreille fermée. L'objectif du participant est de déterminer lequel des deux sons est perçu le plus fort, premier son (son 1) ou second son (son 2) entendu. Un son est émis par le casque audio ouvert et l'autre par l'ostéophone. Le gain entre les deux signaux transmis aux deux différents écouteurs est le gain moyen obtenu avec le micro 2 (Figure 10). Les deux signaux devraient donner un niveau sonore identique à la position du micro 2 dans le conduit auditif. Ce test a été réalisé sur les mêmes 12 fréquences utilisées pour l'estimation des fonctions de transfert. Pour chaque fréquence 10 comparaisons ont été réalisées, dont 5 avec l'ostéophone qui émet en premier. L'ordre des fréquences et le choix du premier écouteur est aléatoire

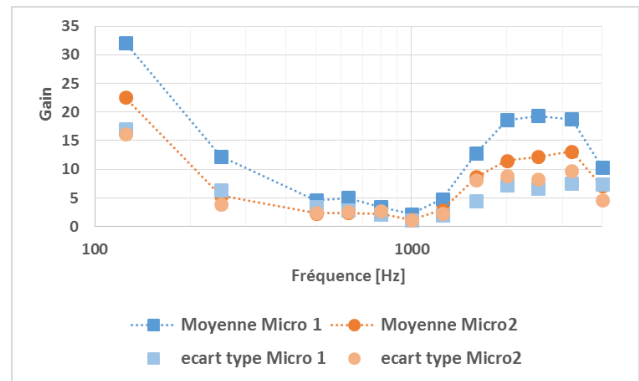


Figure 10 : Moyenne et écart-type du gain à appliquer au signal de l'ostéophone par rapport à celui du casque audio ouvert pour avoir le même niveau sonore dans le conduit auditif.

### 4.2 Résultats

Sur les vingt-trois auditeurs ayant participé à la mesure des fonctions de transfert, dix-sept auditeurs âgés de 24 ans à 57 ans (moyenne de 43 ans) ont participé à ce test de comparaison entre un son émis par le casque ouvert et un son émis par l'écouteur ostéophonique. Tous les auditeurs ont déclaré ne pas avoir de problème auditif.

La Figure 11 donne les résultats en indiquant le nombre moyen des sons ressentis les plus forts selon l'écouteur utilisé (casque ouvert ou ostéophone) pour chaque fréquence (avec 10 sons par fréquence). Quelle que soit la fréquence, en moyenne, on entend plus fort lorsque le signal est généré par l'ostéophone. Pour chaque fréquence une analyse ANOVA a été réalisée afin de déterminer si la différence entre les deux écouteurs est significative ou pas. La différence est très significative pour toutes fréquences sauf pour 3150 Hz où la différence est légèrement significative ( $p\_value=0,022$ ) et elle est non significative pour les deux fréquences extrêmes 125 Hz et 4000 Hz.

Sachant que le gain entre l'ostéophone et le casque ouvert utilisé est la moyenne des gains obtenus sur les vingt-trois auditeurs, on a séparé les sujets en trois groupes : un groupe dont le gain est le gain moyen  $\pm 3$ dB, un groupe dont le gain est supérieur et un groupe dont le gain est inférieur. Pour ces trois groupes on a obtenu des courbes similaires à celles présentées sur la Figure 11. Si on entend effectivement plus fort avec l'ostéophone deux suppositions peuvent être faites :

- La contribution du chemin 3 « ostéo/ostéo » est non négligeable,
- Le niveau sonore près du tympan dû à la contribution du chemin 2 est plus fort que celui mesuré par le micro 2 et donc le gain utilisé est très important par rapport à la réalité.

Pour une fréquence donnée, sur les 10 comparaisons, si l'auditeur répond au moins 8 fois sur l'un des deux écouteurs, c'est que l'auditeur est sûr d'entendre plus fort le son pour cet écouteur. La Figure 12 représente donc le pourcentage d'auditeurs qui sont sûrs que le son est perçu plus fort lorsque l'ostéophone émet ou lorsque le casque ouvert émet. Elle donne également le pourcentage de personnes qui doutent entre les deux écouteurs. On constate que quelle que soit la fréquence supérieure à 125 Hz moins de 10 % des auditeurs sont sûrs que le son est plus fort avec le casque audio ouvert. Par contre le nombre d'auditeurs

qui sont sûrs avec l'ostéophone varie en fonction de la fréquence avec un maximum de 94 % à 800 Hz et 1000 Hz.

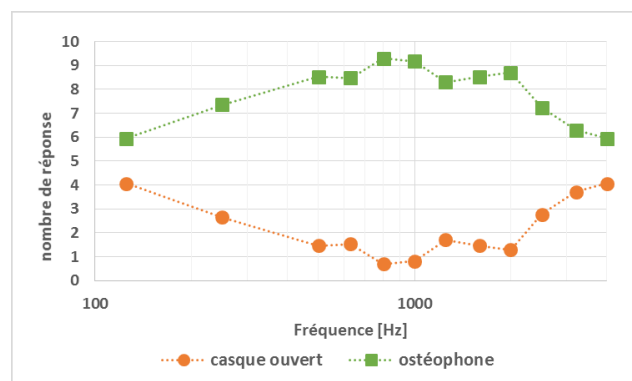


Figure 11 : Nombre moyen (sur 10 comparaisons) de sons perçus plus forts par rapport à l'écouteur utilisé (ostéophone ou casque ouvert) en fonction des différentes fréquences.

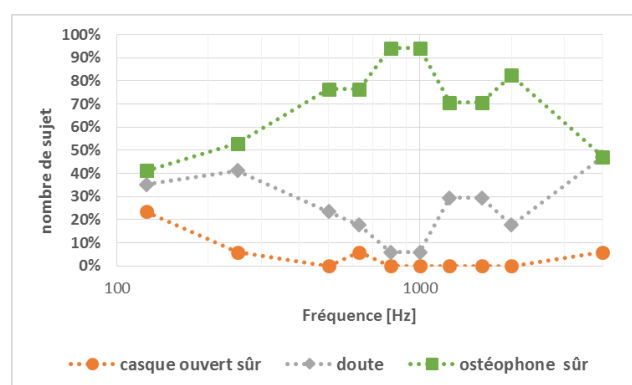


Figure 12 : Pourcentage de participants qui sont sûrs d'entendre plus fort sur une des deux conditions d'écoute et le pourcentage de participants qui doutent.

## 5 Conclusion

Les différents essais réalisés sur plusieurs auditeurs nous permettent de commencer à mieux comprendre la contribution de chacun des chemins acoustiques avec l'écouteur ostéophonique. Le premier test compare deux conditions d'écoute (oreille fermée et ouverte) et nous permet de dire que pour la plupart des auditeurs testés :

- Dans les basses fréquences (< 1000 Hz), le son est perçu plus fort sur l'oreille fermée, le chemin 2 avec l'effet d'occlusion est prépondérant.
- Dans les hautes fréquences ( $\geq 2000$  Hz), le son est perçu plus fort sur l'oreille ouverte, le chemin 1 est non négligeable.
- A partir de 630 Hz le nombre d'auditeurs qui doutent augmente pour atteindre son maximum à 1600 Hz. Sachant qu'à 1600 Hz l'effet d'occlusion est très faible, s'ils doutent c'est que les auditeurs entendent le même niveau, donc l'apport supplémentaire du chemin 1 pour l'oreille ouverte ne suffit pas pour rendre le son plus fort.

Avec le deuxième test concernant les mesures des fonctions de transfert on constate que le niveau sonore

constitué uniquement du chemin 1 (mesuré dans le cas du micro 3) est plus faible que le niveau sonore constitué du chemin 1 et 2 pour les fréquences inférieures à 2500 Hz. Pour les fréquences supérieures le niveau est identique pour les deux positions de mesure entre le micro 1 et le micro 3. La différence entre la fonction de transfert mesurée par le micro 3 et celle du micro 2 correspond à l'apport du chemin 2 qui est important pour les fréquences inférieures à 2000 Hz. Ces mesures de fonctions de transfert ont permis de mettre en évidence que le chemin « ostéo/aérien » joue un rôle essentiel dans la perception du son émis par l'ostéophone.

Le troisième test a montré que le signal sonore est perçu plus fort avec l'écouteur ostéophonique qu'avec le casque audio ouvert même si le niveau sonore des deux sons au début du conduit auditif est a priori identique.

En résumé, on a montré que le chemin 2 « ostéo/aérien » a une grande importance sur le son perçu pour les fréquences inférieures à 2000 Hz. Pour les fréquences supérieures à 2000 Hz, le rayonnement dans l'air devient non négligeable. Le chemin 3 « ostéo/ostéo » n'a pas pu réellement être mis en évidence. En effet, on ne sait pas si les résultats du test subjectif comparant une source sonore aérienne avec l'ostéophone, sont dus à une mauvaise estimation du gain ou à la contribution du chemin « ostéo/ostéo ».

Enfin, il est important de noter que les résultats obtenus lors de ces différents tests sont conditionnés par les performances ostéophoniques / aériennes du transducteur utilisé. Des résultats différents pourraient être obtenus avec d'autres types de transducteurs.

## Remerciements

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

## Références

- [1] E. Barany, A contribution to the physiology of bone conduction, Acta Oto-Laryng., Stockh., Suppl. 26, (1938).
- [2] G. Békésy, Experiments in hearing, McGraw-Hill Book Company, New York, (1960), 745 pp.
- [3] I.J. Hirsh, La mesure de l'audition, Presses Universitaires de France, Paris, (1956), 386 pp
- [4] D. Dirks & J.G. Swindeman, The variability of occluded and unoccluded bone-conduction thresholds, J. of Speech and Hearing Res., 10, 232-249, (1967).
- [5] J. Tonndorf, Bone conduction. Studies in experimental animals, Acta Oto-laryngol, suppl. 213, (1966).
- [6] R. Shimokura et al., Cartilage conduction hearing, J. Acoust. Soc. AM. 135 (4), 1959-1966 (2014).
- [7] S. Stenfelt et al., Factors contributing to bone conduction : the outer ear, J. Acoust. Soc. AM. 113 (2), 902-913 (2003).
- [8] T. Nishimura et al., Cartilage Conduction is characterized by vibrations of the cartilaginous Portion of the Ear canal, Plos ONE 10 (3), March (2015).