



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Université de Lorraine  
Faculté de Pharmacie

# Impact de la profondeur d'embout sur l'autophonation passive

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'Etat d'Audioprothésiste  
par  
Romain HERF

*Année 2017*

*Maître de mémoire*  
**Julien HAEBERLE**

# Remerciements

Je tiens avant tout à remercier mon maître de stage et de mémoire Julien HAEBERLE pour m'avoir guidé durant cette troisième année d'étude mais également pour l'ensemble des connaissances qu'il m'a transmises, ainsi que la patience dont il a fait preuve.

Je tiens aussi à remercier Christian BROCARD qui a joué un rôle très bénéfique pendant cette troisième année, tant durant mon stage que pour les pistes de réflexions qu'il a ouvert dans ce mémoire.

Je tiens à remercier tous les patients et le personnel des laboratoires Audition BH qui m'ont permis de réaliser ce mémoire.

Enfin, je souhaite remercier l'ensemble des professeurs et intervenants de l'école d'audioprothèse de la Faculté de Pharmacie de Nancy pour leur implication auprès des étudiants et le travail remarquable dont ils font preuve chaque jour.

# Sommaire

Introduction.....	1
Chapitre 1 – Rappels anatomiques et audio-prothétiques.....	2
A) Anatomie de l'oreille externe.....	2
a) Le pavillon de l'oreille externe.....	2
b) Le conduit auditif externe.....	3
c) Le rôle de l'oreille externe.....	3
B) L'autophonation.....	6
a) Définition de l'autophonation.....	6
b) Les causes de l'autophonation.....	7
c) Influence de la cavité résiduelle.....	10
d) Autophonation en fonction des phonèmes.....	11
C) L'embout ou coupleur auriculaire.....	12
a) Le dôme.....	13
b) L'embout sur mesure.....	14
D) Le Lyric, un appareillage si particulier.....	15
a) Présentation.....	15
b) Indications du Lyric.....	16
c) Intérêts acoustiques.....	17
d) Intérêt du Lyric sur l'autophonation passive.....	19
E) La mesure In-Vivo et l'Aurical FreeFit.....	20
Chapitre 2 - Protocole et réalisation des tests.....	22
A) Objectifs du protocole... ..	22
B) Protocole.....	22
C) Matériel nécessaire.....	23
D) Choix des sujets.....	24
a) Critères d'inclusion.....	24

b) Critères d'exclusion .....	25
E) Passation du test.....	26
a) Prise d'empreinte.....	26
b) Tests.....	27
c) Réalisation d'embouts profonds.....	29
F) Méthode d'interprétation.....	30
Chapitre 3 – Analyse des données.....	31
A) Mesures objectives.....	31
a) Analyse par bande fréquentielle.....	32
b) Autophonation moyenne.....	36
c) Influence de l'anatomie.....	38
d) Analyse du BING TOO.....	40
e) Cas pratiques.....	41
f) Autres critères possibles.....	42
B) Mesures subjectives.....	47
a) Test.....	47
b) Mise en place.....	48
c) Confort .....	48
Conclusion .....	49

## **Bibliographie**

## **Table des illustrations**

# Introduction

L'une des causes récurrentes d'inconfort voire d'échec d'appareillage pour le patient appareillé est la résonance de sa propre voix. Ce phénomène se nomme autophonation.

A l'heure actuelle, il est fréquent de remédier à cela en aérant le conduit auditif. Malheureusement, cela entraîne une réduction drastique de l'impact des algorithmes développés par les fabricants d'aides auditives. L'audioprothésiste peut alors être amené à faire un choix compliqué entre l'autophonation et certains traitements qui apportent d'autres bénéfices aux patients.

Pourtant, plusieurs études ont été effectuées sur le sujet, notamment en 1988 par KILLION et COLL qui ont travaillé sur les caractéristiques des embouts auriculaires et qui ont démontré que plus l'embout est long, plus l'autophonation semble diminuer. [1a]

La poursuite de ces recherches a par ailleurs amené GRESSIER à présenter, en 2016, un mémoire sur l'« Influence du positionnement de l'appareil LYRIC dans le conduit auditif sur l'autophonation passive ». [2] Ce travail a ainsi permis de mettre en avant qu'un positionnement en fond de conduit auditif de l'appareil auditif Lyric permettait de faire baisser sensiblement l'autophonation passive et donc d'améliorer le confort du patient.

On peut donc se demander si un embout profond permettrait de faire baisser l'autophonation, et donc d'occlure plus facilement l'oreille, tout en préservant le confort du patient.

Pour répondre à cette problématique, nous effectuerons tout d'abord quelques rappels anatomiques et audioprothétiques. Puis, nous expliquerons le protocole que nous avons mis en place afin de vérifier notre hypothèse. Enfin, nous reviendrons sur les mesures réalisées. Le confort et la praticité de l'embout profond seront ensuite étudiés, ce qui nous permettra, en analysant l'ensemble des données expérimentées, de conclure quant à la pertinence de poser un embout profond pour résoudre, de manière confortable, le problème de l'autophonation.

# Chapitre 1 – Rappels anatomiques et audio-prothétiques

L'autophonation dont nous traiterons dans ce mémoire est directement liée, d'une part, à la cavité résiduelle et donc à l'anatomie de l'oreille, et, d'autre part, à l'embout. C'est pourquoi, dans un premier temps, nous effectuerons différents rappels sur l'anatomie de l'oreille externe, puis sur l'autophonation et sur l'embout. Des rappels sur le Lyric seront donnés pour comprendre l'étude qui a inspiré ce mémoire, ainsi que sur la mesure In-Vivo, outil qui s'est avéré indispensable pour la réalisation du protocole.

## A) Anatomie de l'oreille externe

Pour la réalisation d'un embout auditif, il est important de bien maîtriser l'anatomie de l'oreille externe. Nous rappellerons donc ici ce que sont le pavillon, le canal auditif externe et le rôle de l'oreille externe.

### a) Le pavillon de l'oreille externe

Les pavillons sont les parties les plus visibles de l'oreille. Ils sont situés de part et d'autre du crâne, en haut et en avant de la région sterno-cléido-mastoïdienne, en arrière et en-dessous de la région sous-temporale.

A l'exception du lobule, les pavillons ont une structure cartilagineuse. [1b]

Chaque pavillon se décompose en plusieurs parties, comme le montre la figure suivante.

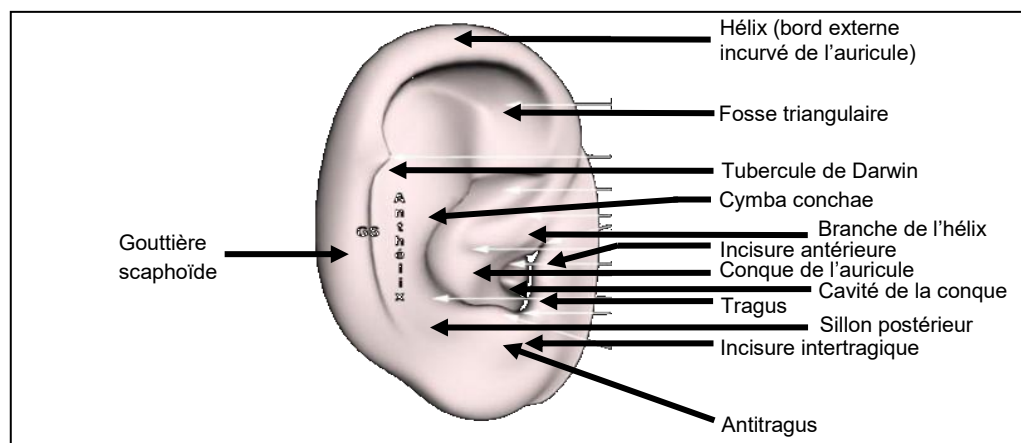


Figure 1 : Le pavillon [3]

Le pavillon est relié au tympan par le canal auditif externe (CAE).

## b) Le conduit auditif externe [1a]

Egalement appelé canal auriculaire, le CAE présente 2 coudes (courbures) : une postéro-antérieure et une supéro-inférieure. Son diamètre varie entre 4 et 10 mm. Son organisation et sa structure interne, du début du CAE (à gauche, noté à 0,0 mm), jusqu'au tympan situé à 33,6 mm de profondeur par rapport à la partie externe du CAE, se présentent selon les caractéristiques que l'on peut schématiser ainsi :

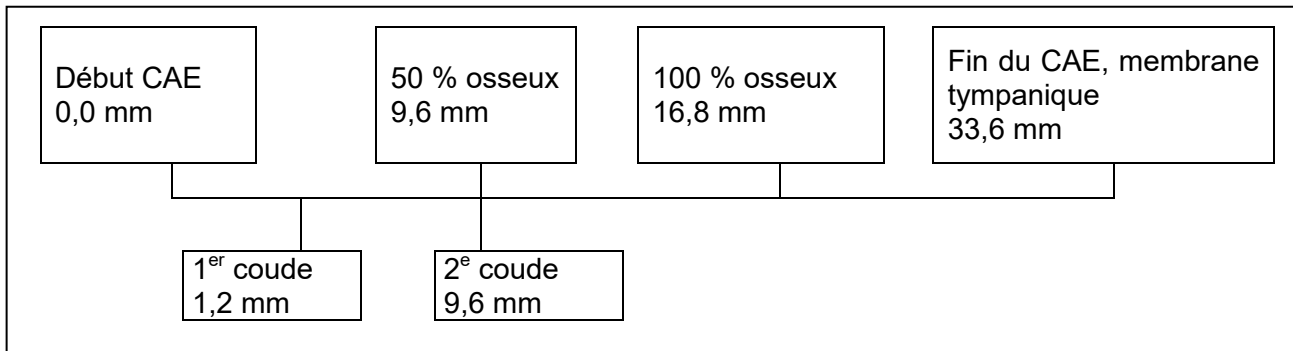


Figure 2 : Schématisation du canal auditif externe

Le premier tiers extérieur du CAE est composé d'une partie fibro-cartilagineuse. La peau y est plutôt épaisse, parsemée de glandes cérumineuses et sébacées. Les deux tiers intérieurs qui suivent constituent quant à eux une partie osseuse qui se compose de la gouttière tympanique, recouverte d'une fine couche de peau sans poil ni glande. Plus la peau est proche du tympan, plus elle est fine.

Voyons maintenant quel est le rôle de ces composantes de l'oreille externe.

## c) Le rôle de l'oreille externe

L'oreille externe possède différents rôles dans l'audition :

- Le pavillon ainsi que le crâne permettent de diffracter les ondes sonores,
- Le conduit auditif et la conque se comportent comme des résonateurs.

Le complexe du pavillon et du conduit auditif externe engendre la fonction de transfert de l'oreille externe qui modifie l'amplitude et la phase de l'onde acoustique incidente. Ces modifications sont propres à la fréquence de l'onde ainsi qu'à l'angle d'incidence. L'ensemble de ces modifications crée, entre chaque oreille, pour des fréquences supérieures à 500 Hz, une différence de phase et/ou de niveau de pression acoustique que le cerveau va analyser pour localiser l'origine de la stimulation sonore.



En revanche, pour les fréquences inférieures à 500 Hz, la localisation est difficile car la longueur d'onde est disproportionnée par rapport à l'écartement des oreilles. [4] En effet, la longueur d'onde est liée à la célérité de l'onde ainsi qu'à sa fréquence par la formule suivante :

$$\text{longueur d'onde} = \frac{\text{célérité (c)}}{\text{fréquence (f)}}$$

Donc, plus la fréquence est basse, plus la longueur d'onde est grande.

Plus concrètement, lorsqu'une onde acoustique parvient au niveau de l'oreille externe, celle-ci se voit amplifier par le pavillon puis par le conduit auditif. L'onde résultante dépend de l'angle d'incidence, de la fréquence et de l'anatomie de chacun (formes et volumes du CAE et de l'OE). L'information sensitive résultante est ensuite traitée au niveau central. Voici visuellement comment se traduit ce parcours :

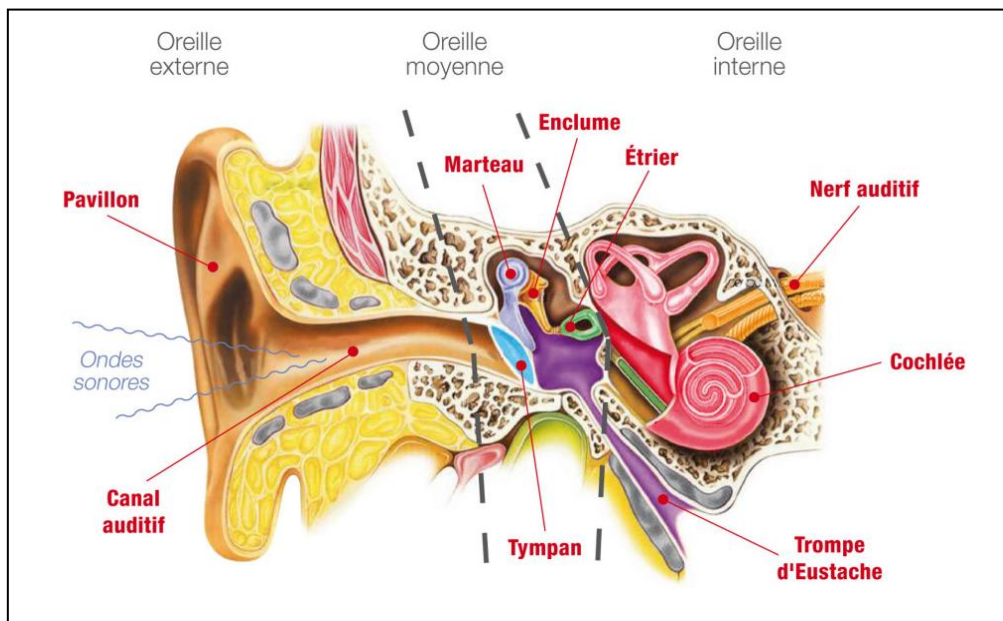


Figure 3 : Coupe d'une oreille [5]

La fonction de transfert peut par ailleurs se schématiser selon le graphique ci-après sur lequel on visualise l'effet du canal auditif externe en bleu et celui du pavillon en vert. La courbe rouge représente quant à elle le gain cumulé (c+p), ce qui correspond donc au gain acoustique (l'amplification) naturel réalisé grâce au canal auditif externe et au pavillon.

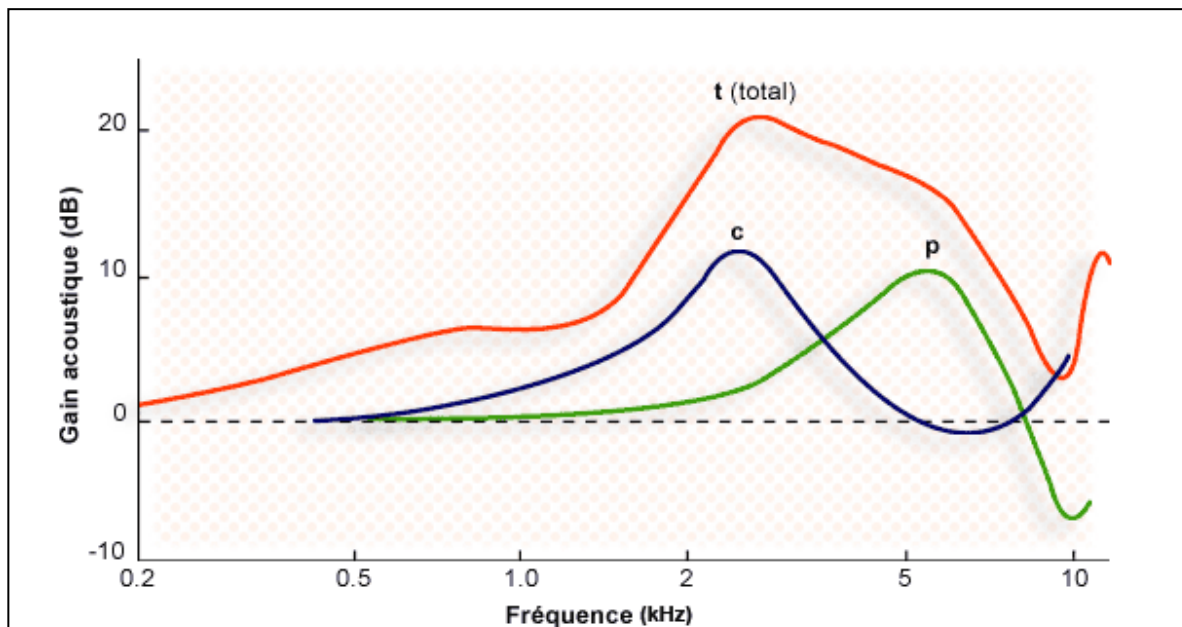


Figure 4 : Fonction de transfert de l'OE [6]

Note : cette courbe a été réalisée avec, pour stimulation, un son pur de 3 000 Hz envoyé à l'azimut 45° sur un plan horizontal.

Ainsi, on remarque que, comme expliqué précédemment, la fonction de transfert affecte d'avantage les hautes fréquences que les basses.

On constate aussi un pic d'amplification aux alentours des 3 kHz, ce qui peut se démontrer de façon analytique :

- Un conduit auditif peut être assimilé à un tube de longueur L fermé sur une extrémité et ouvert de l'autre,
- Dans ce tube, si l'on procède à une simulation acoustique, on a la formation d'une onde progressive et d'une onde régressive,
- Dans le cas du CAE, l'onde régressive correspond à l'onde progressive réfléchiée par le tympan. Il y a donc 2 ondes qui s'opposent.

La sommation de ces 2 ondes forme une onde stationnaire qui est représentée par :

$$f(x, t) = A \cdot \sin(\omega t - kx) + A \cdot \sin(\omega t + kx) = 2A \cdot \cos(kx) \cdot \sin(\omega t)$$

Soit :

$$f(x, t) = \text{onde progressive} + \text{onde régressive} = \text{onde stationnaire}$$

Les ondes stationnaires ainsi créées peuvent se décomposer en harmoniques. Ces dernières sont représentées par les multiples entiers de la fréquence fondamentale qui correspond à la plus grande longueur d'onde qu'il est possible d'émettre avec un tube ou une corde, soit la fréquence la plus basse. [7]

La formule générale des harmoniques d'un tube ouvert/fermé est [8]  $f_n$  :

$$f_n = (2n - 1) \frac{c}{4L}$$

Avec :

- $n$ , numéro du rang de l'harmonique,
- $c$ , la célérité,
- $L$ , la longueur du tube,
- $f$ , la fréquence,

Dans le cas de l'air (et donc de l'oreille) :

- $c$  = célérité du son =  $331 \text{ m.s}^{-1}$ ,
- $L$  = profondeur du conduit auditif, soit à peu près  $2,5 \text{ cm}$ .

La première harmonique apparaît donc à :

$$f_1 = 1 * \frac{331}{4 * 2.5 * 10^{-2}} = 3\,310 \text{ Hz}$$

Ainsi, on remarque qu'une résonance est présente à  $3\,310 \text{ Hz}$ .

Cette fréquence de résonance exacte dépend de l'anatomie de chaque conduit auditif.

Dans cet exemple, par souci de simplification, nous considérons le tympan infiniment rigide et assimilons le conduit auditif externe (CAE) à un tube fermé d'un côté qui générera des résonances que nous considérons en audioprothèse comme étant une autophonation.

## B) L'autophonation

Afin de bien comprendre le protocole que nous avons établi, il est important de maîtriser les mécanismes de l'autophonation. En voici donc les quelques rappels nécessaires.

### a) Définition de l'autophonation

L'autophonation est la sensation d'entendre sa propre voix.

Une simple pression effectuée sur le tragus lorsque nous prononçons une phrase permet d'en faire l'expérience.

On distingue l'autophonation passive de l'autophonation active. [1c]

En effet :

- L'autophonation passive est liée à l'effet d'occlusion, c'est-à-dire d'oreille bouchée. Son amplitude dépend du patient mais aussi de l'embout. Plusieurs paramètres rentrent en compte tels que sa forme, sa longueur, l'évent, etc. [9]
- L'autophonation active se produit quand l'appareil auditif est en fonctionnement. Elle semble beaucoup moins importante que l'autophonation passive.

## b) Les causes de l'autophonation

L'autophonation est provoquée par 4 principaux flux d'énergie [10] :

- Le flux amplifié de la propre voix du patient émis par l'appareil,
- Le flux direct provenant de la voix et passant principalement par l'évent ou l'aération,
- Le flux osseux :
  - par la propagation cartilagineuse,
  - transmis aux os par les cordes vocales,
- Le flux réverbéré par le tympan.

Une façon très efficace de réduire l'autophonation est d'aérer l'oreille en ouvrant l'embout auriculaire ou en augmentant l'évent. En effet, cela provoque des fuites acoustiques qui entraînent une évacuation du flux osseux et du flux réverbéré par le tympan vers l'extérieur. Cette évacuation vient donc affaiblir la résonance, ce qui atténue l'autophonation.

Cependant, en traitant la résonance de cette manière, on impacte d'autres paramètres de l'appareillage auditif tels que le gain, le larsen ou encore les traitements numériques.

Le phénomène de résonance a été étudié par VON BEKESY dont les travaux montrent que la pression acoustique (principalement pour les fréquences inférieures à 500 Hz) est transmise par les tissus mous tels que les tissus cartilagineux présents au niveau du CAE. Ces vibrations se retrouvent bloquées dans le conduit auditif et vibrent en opposition de phases par rapport au crâne. [11]

En effet, nous savons que l'onde acoustique se propagera toujours vers l'impédance la plus faible. L'impédance de l'air étant plus faible que celle du tympan, lorsque l'oreille est ouverte, l'onde acoustique se propage vers l'extérieur ; il n'y a alors pas ou peu d'autophonation.

De plus, on sait que l'impédance du tympan est plus faible pour les basses fréquences que pour les hautes fréquences, ce qui va dans le sens d'une plus importante autophonation en basses fréquences. [1d]

Par ailleurs, l'onde acoustique ne se propage pas de la même façon dans l'oreille ouverte et dans l'oreille fermée :

- Dans le cas de l'oreille ouverte, le flux osseux arrivant dans le canal auditif externe est en partie évacué vers l'extérieur de l'oreille. Seule une faible partie est absorbée par le tympan,
- Dans le cas de l'oreille fermée, l'ensemble du flux osseux résonne dans la cavité résiduelle, une quantité d'énergie bien plus importante est donc transmise au tympan. C'est pourquoi, en audioprothèse, plus l'oreille est fermée, plus le risque d'autophonation passive est important.

La figure ci-après illustre ce phénomène :

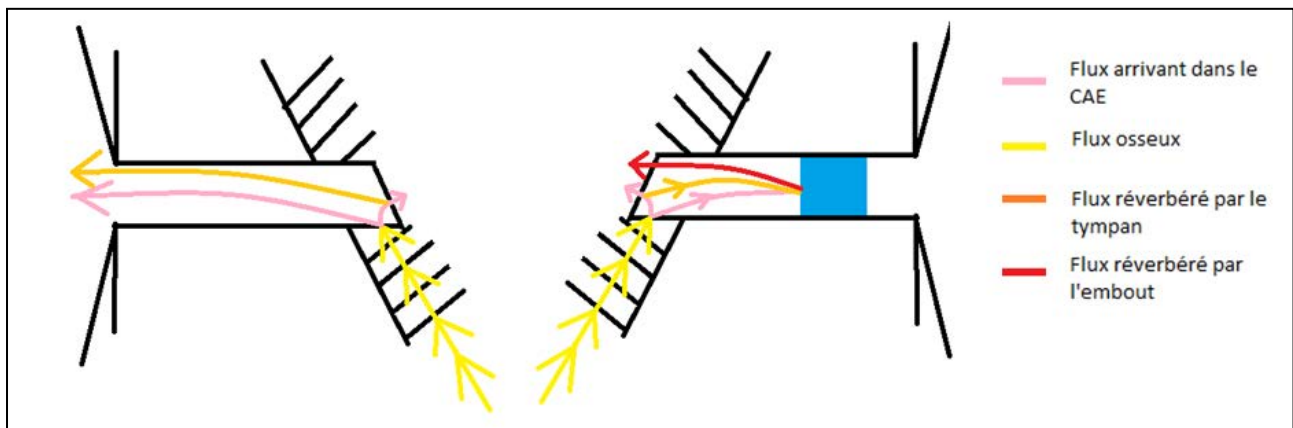


Figure 5 : Flux vibratoires avec et sans embout

Pour mesurer la résistance du tympan, il existe un examen, l'impédancemétrie, qui permet de déterminer le bon fonctionnement de la chaîne tympano-ossiculaire grâce à la tympanométrie et l'analyse du réflexe stapédien.

Pour cela, il faut introduire une sonde dans le conduit auditif externe et mesurer la différence entre la pression acoustique de la stimulation et celle mesurée par la sonde. Cela permet de déterminer la quantité d'énergie qui a été absorbée par la membrane tympanique, comme le montre la figure suivante.

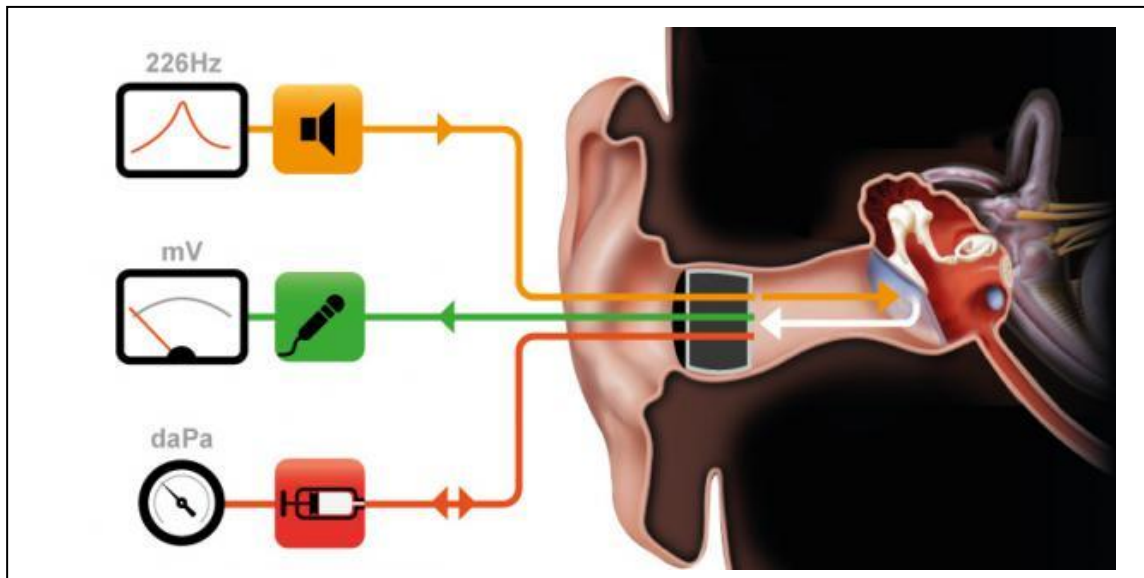


Figure 6 : L'impédancemétrie [12]

Lors de la tympanométrie, des mesures de la compliance ainsi que de l'admittance (l'inverse de l'impédance) sont réalisées. Pour cela, un son pur est émis à 226 Hz, puis la pression varie de + 200 à – 400 daPa dans le conduit auditif externe.  
 Note : pour réaliser une tympanométrie, le tympan ne doit pas être perforé.

Le compte-rendu de tympanométrie permet d'établir la courbe de la compliance de la chaîne tympano-ossiculaire. Plusieurs résultats peuvent être obtenus, tel que le montre la figure ci-dessous :

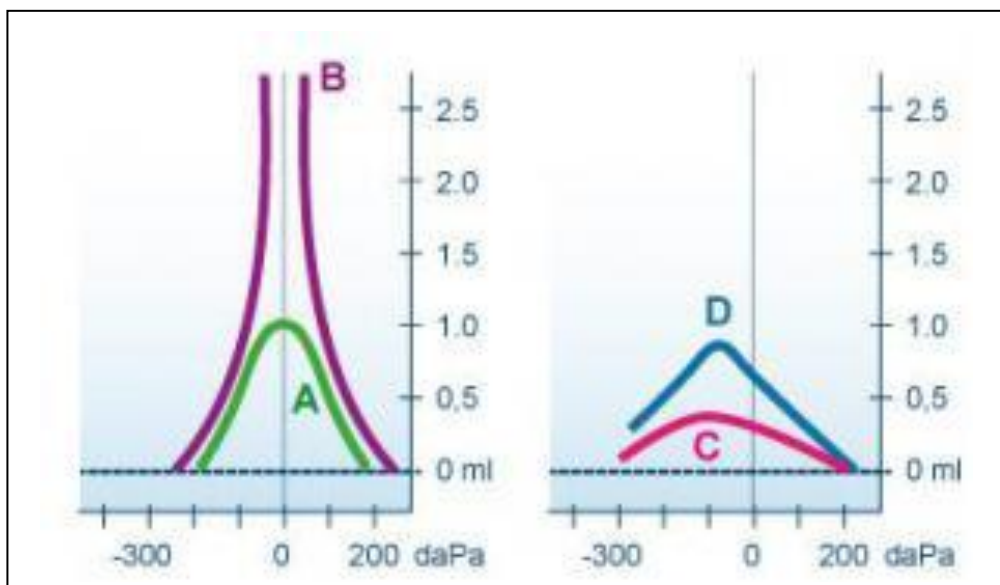


Figure 7 : Exemples de tympanométries [12]

Ici, on constate que :

- La courbe A correspond à une tympanométrie normale,
- La courbe B témoigne d'un tympan flaccide ou d'une lésion de la

chaîne tympano-ossiculaire,

- La courbe C montre une baisse de la mobilité du tympan qui peut être due à la présence d'un liquide dans l'oreille moyenne, une chaîne ossiculaire fixe ou une tympanosclérose (épaississement du tympan),
- La courbe D représente une dépression de la caisse tympanique, pouvant, par exemple, être causée par un dysfonctionnement tubaire. [12]

Trois facteurs influencent l'impédance du tympan :

- La rigidité,
- La masse du système tympano-ossiculaire,
- La résistance aux frottements.

L'ensemble de ces facteurs peut être modifié par différents éléments anatomiques ou pathologiques comme ceux décrit précédemment sur la Figure 5 « Flux vibratoires avec et sans embout » (cf. B) L'autophonation b) Les causes de l'autophonation).

Il est donc possible de mesurer la résistance du tympan via la tympanométrie. Cependant, un autre facteur important entre en jeu dans la résonance du CAE : la cavité résiduelle.

### c) Influence de la cavité résiduelle

Comme expliqué précédemment, la cavité résiduelle influence l'autophonation. Par extension, on peut déduire que la profondeur d'embout peut avoir une importance dans l'autophonation.

En 1996, M. GERBAUD a étudié cette influence et mis en place le tableau suivant qui représente le volume de la cavité résiduelle par rapport au volume du CAE pour différentes profondeurs d'embout [1e] :

Volume résiduel moyen	Embout long	Embout moyen	Embout court
En ml	0,18	0,46	0,75
En %	15,6	40,3	64,5

**Tableau 1 : Volume de la cavité résiduelle moyenne en fonction de l'embout auriculaire**

Puis, il a mis en avant que l'autophonation augmente lorsque la cavité résiduelle augmente, particulièrement pour les fréquences 200 Hz et 250 Hz.

Il avance également que l'augmentation de la cavité résiduelle et l'amplitude de l'autophonation semblent être proportionnelles.

Cependant, on sait que la résonance dépend de la fréquence. Or, dans le langage humain, nous utilisons différentes fréquences, il y a donc plusieurs résonances. On peut alors se demander si certains phonèmes résonnent plus que d'autres.

#### d) Autophonation en fonction des phonèmes

Les organes permettant la vocalisation peuvent se classer en 3 groupes selon leurs rôle :

- Les organes respiratoires : thorax, poumons,
- Les organes phonatoires : cordes vocales,
- Les organes articulatoires : langue et lèvres.

Ces organes et la façon dont on les utilise permettent de créer des phonèmes. Chacun d'entre eux peut ainsi être classé selon son mode et son lieu d'articulation :

Mode articulaire	occlusives		constrictives			sonantes		
	sourdes	sonores	sourdes	sonores	doubles	nasales	latérales	vibrantes
Lieux d'articulation :								
- Bilabiales	p	b			y w	m		
- Labiodentales			f	v				
- Dentales et alvéolodentales	t	d				n		
- Alvéolaires			s	z			l	(r)
- Post-alvéolaires			ʃ	ʒ				
- Médiopalatales				j	y	(ɲ)		
- Post-palatales	k	g						
- Pré ou postvélares	k	g			w	ŋ		
- Post-vélares	k	g						R
- Uvulaires								
- Pharyngales								(ʁ)
- Laryngales	( ? )		(h)					

Tableau 2 : Modes et lieux d'articulation des phonèmes [13]

Ainsi :

- [y] et [w] sont des constrictives sonantes à double articulation,
- r correspond au r roulé.
- [R] est le R standard prononcé en faisant vibrer le voile du palais (éventuellement la lèvre),
- [ʁ] correspond au R dévibré comme dans « pire ».



De la même façon, les voyelles sont classées selon leur degré d'ouverture et leur position dans la cavité buccale. Cela peut être représenté sur le triangle vocalique ci-dessous :

	avant		arrière
fermé	i y		u
	e ø		o
	ɛ œ		ɔ
ouvert	a	ɑ	

Figure 8 : Triangle vocalique [14]

Les phonèmes dits « fermés » sont ceux qui vibrent le plus et donc ceux où le risque d'autophonation passive est le plus important. Ainsi, d'après la lecture du triangle vocalique, on peut identifier [i], [y] et [u] comme étant les sons les plus à même de provoquer une autophonation.

Durant le protocole qui sera détaillé plus loin (Chapitre 2 - Protocole et réalisation des tests, B) Protocole), le patient devra prononcer un phonème dans le but de générer un maximum d'autophonation passive. Le [i] étant le phonème qui engendre le plus de flux osseux, donc une onde acoustique importante dans le canal auditif externe, il semble que ce soit là le choix le plus judicieux pour étudier les résonances qui sont liées à des vibrations qui sont susceptibles de se bloquer dans la cavité résiduelle, entre le tympan et l'embout.

### C) L'embout ou coupleur auriculaire

L'embout auriculaire est la partie de l'aide auditive qui se loge dans l'oreille du patient. Celle-ci remplit les rôles de maintien et d'acoustique.

Il doit également satisfaire certains critères qui sont importants pour les patients :

- Être confortable,
- S'adapter à la morphologie de l'oreille du patient,
- Être pratique pour la manipulation,
- Être discret,
- Ne pas être traumatisant pour l'oreille : cartilage, peau, pathologies de l'oreille externe,
- Ne pas s'opposer aux contre-indications médicales : patient sujet aux otites, champignons, etc.

Aujourd'hui il existe 2 grandes catégories d'embouts qui remplissent plus ou moins les rôles attendus :

- L'embout standard ou dôme,
- L'embout sur mesure.

En voici la présentation détaillée.

#### a) Le dôme [15]

Le dôme est un embout standardisé. Chaque marque qui commercialise des solutions auditives en propose, avec une offre plus ou moins large de diamètres et d'aérations différents, comme on le voit ici dans le catalogue de l'un des nombreux distributeurs [16] :

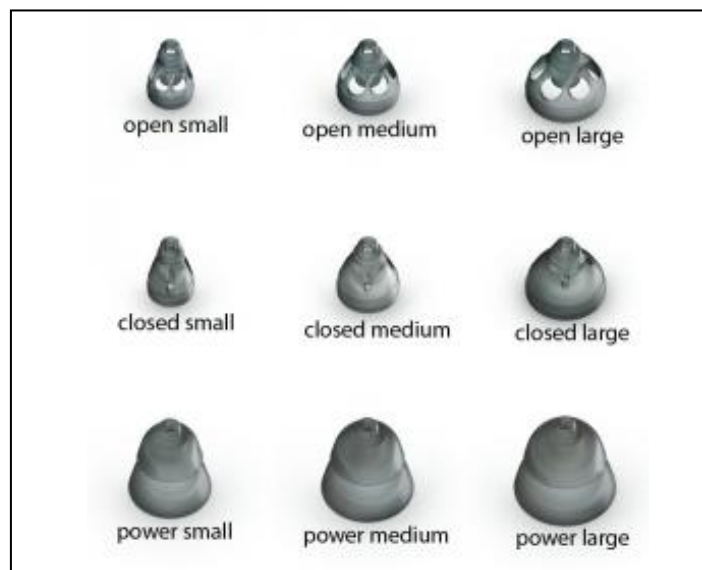


Photo 1 : Exemples de différents types de dômes

Ces produits ont l'avantage d'être peu onéreux et de permettre une mise en place rapide de l'appareillage.

Néanmoins, les modèles de dômes étant sériques, ils ne peuvent pas être modifiés et sont rarement fixes dans le conduit auditif externe. Leurs mouvements entraînent donc des problèmes chez certains patients :

- Perte de confort,
- Irritation,
- Modification constante de la cavité résiduelle,
- Marge de manœuvre du praticien limitée.

## b) L'embout sur mesure

L'embout sur mesure est réalisé grâce à une prise d'empreinte, c'est-à-dire l'injection d'une pâte dite « à empreinte » dans le conduit auditif du patient. L'empreinte permet ainsi de fabriquer un embout auriculaire qui sera spécifiquement adapté au patient. Il aura alors une meilleure étanchéité, un meilleur confort et plus de maintien. Il présente également l'avantage d'être modifiable par l'audioprothésiste.

Il existe des modèles classiques tels que [17] :

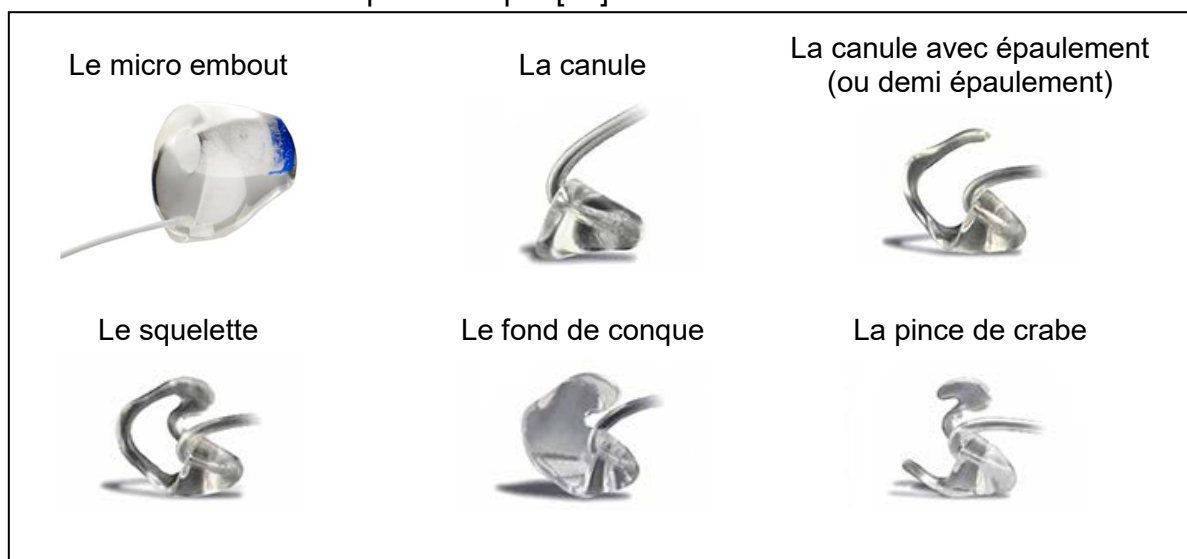


Photo 2 - Différents types d'embouts auriculaires

De façon générale, ces embouts laissent une cavité résiduelle relativement importante, ce qui crée une autophonation passive plus ou moins marquée.

Afin de combler ce défaut, de plus en plus d'audioprothésistes adoptent un nouveau système d'appareillage disposé en fond de conduit auditif : le Lyric.

## D) Le Lyric, un appareillage si particulier

Le Lyric est un appareil atypique de par son mode d'utilisation et son positionnement profond qui induit une faible cavité résiduelle. Il peut donc être intéressant d'étudier la relation entre la profondeur du Lyric et l'autophonation.

C'est ce qu'a analysé GRESSIER qui, dans son mémoire « Influence du positionnement de l'appareil LYRIC dans le conduit auditif sur l'autophonation passive » [2], a démontré que le positionnement du Lyric a une incidence directe sur l'autophonation passive. C'est la raison pour laquelle nous nous intéressons ici à cet appareillage si particulier.

### a) Présentation

Le Lyric est un appareil à port permanent mis sur le marché par Phonak en 2008 aux Etats-Unis. Il est plutôt destiné aux pertes d'audition légères à moyennes.

Sa principale caractéristique est un positionnement profond, c'est-à-dire à 4 mm du tympan. Une fois positionné au fond du conduit auditif par l'audioprothésiste, il y restera, sauf en cas de problème, jusqu'à épuisement de son énergie, c'est-à-dire au bout de 70 jours si l'activation est continue.

Ce positionnement profond apporte au patient une discrétion quasi-totale et entraîne la disparition des contraintes liées à la manipulation d'une aide auditive.

Le Lyric de 3<sup>e</sup> génération mesure 12 mm de long et son diamètre varie en fonction de la taille du conduit auditif du patient. Le positionnement et le port permanent du Lyric impliquent des protections efficaces, c'est pourquoi le micro est protégé par une grille hydrophobe et une cheminée de protection. L'écouteur est quant à lui protégé par un pare-cérumen.

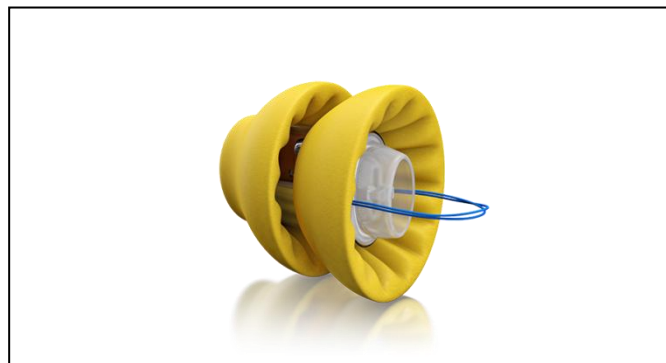


Photo 3 : Appareil Phonak Lyric [18]

## b) Indications du Lyric

Du fait de son positionnement profond et de son port permanent, le Lyric ne peut pas être adapté à tout le monde. Certains paramètres sont donc à vérifier pour mettre en place l'embout profond que nous étudions dans ce mémoire.

- Critères favorables :
  - Conduit auditif sain, sans problème de peau, aucune malformation, etc.,
  - Surdité légère à moyenne, parfois sévère,
  - Essai du factice concluant.
  
- Critères défavorables :
  - Durant l'anamnèse :
    - En cas de diabète non contrôlé, d'immunod  fiance ou de thérapie anticoagulante, il faut demander l'accord du médecin,
    - Si le conduit est sensible, ce qui est souvent le cas si le patient a subi des radiothérapies de la tête et/ou du cou,
    - Aucune chimiothérapie ne doit avoir été effectuée depuis 6 mois.
  - Durant l'otoscopie :
    - Morphologie du conduit : trop petit, coude trop prononcé, exostose, ostéome, sténose, cavité d'évidement, etc.,
    - Otite chronique, otite externe, etc.,
    - Peau du conduit trop fine ou sèche, eczéma,
    - Production de cérumen importante,
    - Perforation de la membrane tympanique.
  - Durant l'audiométrie :
    - Perte hors de la plage d'adaptation,
    - Audiogramme en pente inversée.

Ainsi, le Lyric peut être utilisé sur une plage de d'utilisation relativement précise que récapitule la figure suivante :

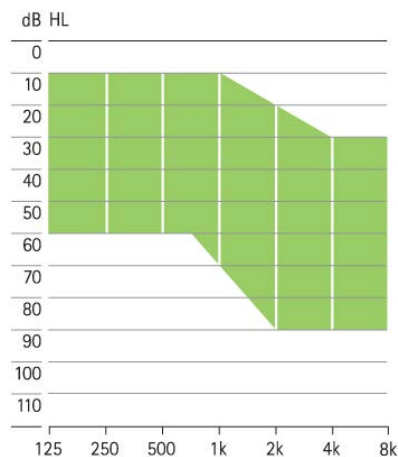


Figure 9 : Plage d'application du Lyric [18]

### c) Intérêts acoustiques

Un appareillage en fond de conduit auditif engendre obligatoirement une cavité résiduelle réduite. Il peut donc être intéressant d'étudier les modifications acoustiques engendrées par la réduction de la cavité résiduelle et donc du volume d'air pour une stimulation acoustique identique.

Pour étudier cette réduction du volume d'air dans l'oreille, nous nous sommes intéressés aux travaux de BOYLE et MARIOTTE [19] sur les gaz : ils expliquent en effet que, lorsque la température du milieu est stable, pour un gaz parfait, le volume et la pression sont liés. La courbe de la pression en fonction du volume est alors très proche d'une hyperbole équilatère que l'on peut écrire :

$$P * V = K$$

avec K = une constante à une température donnée. Voici comment cela peut se traduire :

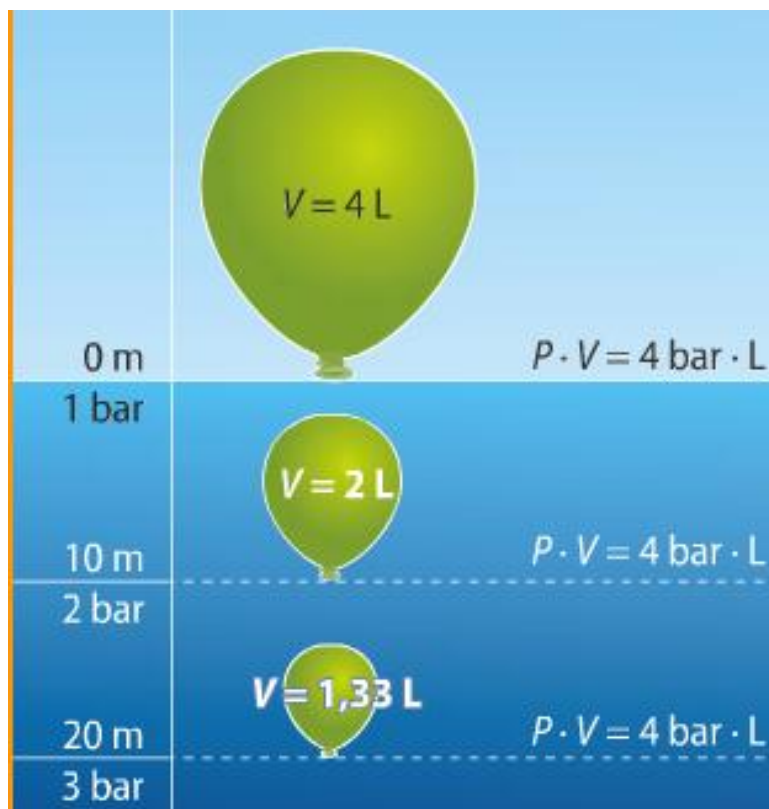


Figure 10 : Loi de BOYLE et MARIOTTE [20]

En s'appuyant sur ce travail, CHASIN démontre en 1994 que plus le volume de gaz est faible, plus la pression est grande. Par extension à l'audioprothèse, on peut dire que plus l'embout est profond, plus la cavité résiduelle est faible et plus l'amplitude de la pression acoustique au tympan est grande si l'embout est fermé. [1d]

On peut donc ainsi obtenir un gain d'insertion élevé qui permet de réduire le gain de l'appareil pour un même niveau de pression acoustique au tympan. Cela peut notamment aider à maximiser le gain au tympan ou à utiliser un écouteur moins puissant sur certains patients qui subiront ainsi moins de bruit de fond.

Note : un autre facteur influençant une réduction possible du niveau de sortie est la direction de l'écouteur directement vers le tympan puisque cela provoque une perte acoustique minimale.

Par ailleurs, comme tout intra-profond, le Lyric permet de conserver une très bonne localisation spatiale. En effet, plus le positionnement du microphone sera profond dans le conduit auditif, plus les résonances naturelles de l'oreille externe seront conservées.

C'est ce que démontre une étude réalisée par Starkey qui compare la directivité de l'intra-profond, du contour d'oreille et de l'oreille nue dont il ressort le graphique suivant :

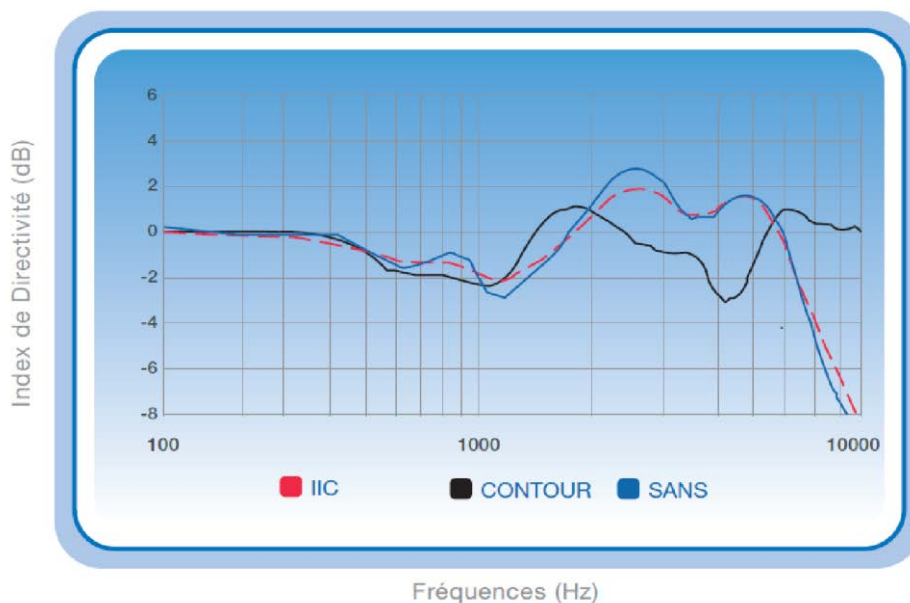


Figure 11 : Comparaison de la directivité de l'IIC, du contour et de l'oreille nue [21]

On observe ici qu'entre 3 et 7 kHz, la directivité est bien plus proche de l'oreille non appareillée avec un appareillage en intra-auriculaire profond qu'avec un appareil en contour d'oreille.

#### d) Intérêt du Lyric sur l'autophonation passive

Cette étude s'inspire également beaucoup du mémoire de GRESSIER sur « L'influence du positionnement de l'appareil LYRIC dans le conduit auditif sur l'autophonation passive », présenté en 2016 à l'université de Rennes. Il y a en effet effectué des mesures d'autophonation passives comparatives entre oreilles ouvertes et avec un appareil Lyric positionné à 6, à 5 et à 4 mm du tympan. La stimulation était un [i] émis par le patient à une intensité de 65 dB, le [i] étant le phonème provoquant le plus d'autophonation passive (cf. Chapitre 1 – Rappels anatomiques et audioprothétiques, B) L'autophonation, d) Autophonation en fonction des phonèmes).

Sur la base de ses calculs, GRESSIER a notamment mis en avant :

- Une ressemblance importante entre les mesures d'autophonation passive (APp) oreilles ouvertes et avec un Lyric éteint placé à 6, à 5 et à 4 mm du tympan. Nous notons d'ailleurs que cela était plus marqué sur les fréquences comprises entre 125 et 500 Hz,
- Que la profondeur d'insertion avait un impact sur l'autophonation passive (2,2 dB entre un positionnement à 4 et à 6 mm du tympan) sur la bande 125-500 Hz. Ainsi, une variation moyenne de 2,2 dB qui paraît physiquement faible a, ici, une réelle influence sur la sensation du patient.

Cette étude montre donc que le positionnement profond du Lyric engendre une baisse d'autophonation passive.

Notre travail de mémoire consistera à étudier si le même phénomène se produit avec un embout profond.

Pour cela, il paraissait intéressant de se pencher plus précisément sur le cas de patients chez qui la modification d'amplitude d'autophonation est particulièrement importante avec un positionnement plus profond, comme ici les conduits de patients « C2 » et « C3 » dont l'autophonation, si elle est quasiment identique entre les mesures effectuées oreilles ouvertes et avec un Lyric à 4 mm du tympan, ne l'est pas lorsque le Lyric est positionné à 5 et 6 mm du tympan :

Conduit	Profondeur du conduit	Niveaux de sortie équivalents sur la bande de fréquences 125-500 Hz en dB SPL			
		Oreille ouverte	Lyric 6 mm	Lyric 5 mm	Lyric 4 mm
C1	30 mm	74,9	74,2	75,3	75,3
C2	22 mm	75,8	85,2	81,5	75,6
C3	30 mm	70,2	84,9	80,5	69,6

Tableau 3 : Comparaison de l'autophonation de 3 conduits parmi 17 testés avec différents positionnements de Lyric [22]

L'ensemble de ces mesures a été rendu possible grâce à l'Aurical FreeFit dont nous allons maintenant expliquer l'utilité.



## E) La mesure In-Vivo et l'Aurical FreeFit

Pour ajuster la programmation d'un appareil auditif, l'audioprothésiste utilise souvent l'Aurical FreeFit développé par Otometrics.



Photo 4 : Aurical FreeFit [23]

Il s'agit en effet d'un outil de mesure d'oreilles réelles, également appelée « mesure In-Vivo », qui permet, via 2 sondes, de mesurer le niveau sonore au tympan en fonction des fréquences recueillies.

Pour cela, il peut être utilisé sur une oreille ouverte ou sur une oreille fermée (avec ou sans appareil).

C'est cette mesure que nous avons donc utilisée pour notre protocole grâce notamment à des sondes IGT 60 probe tube, plus fines et plus souples que les sondes standards pour faciliter l'insertion et les manipulations.

Nous avons, par ailleurs, eu recours au module « Freestyle » d'Otosuite en mode direct car celui-ci permet au patient d'utiliser sa propre voix comme stimulation plutôt qu'un système prés-enregistré diffusé par une enceinte.

A cet effet, un vumètre est présent sur l'écran de l'ordinateur afin de permettre au patient d'ajuster sa voix au niveau sonore souhaité.

Grâce à ce système, il nous a donc été possible de mesurer, de façon objective, le niveau sonore au niveau du tympan du patient tout en utilisant sa propre voix comme stimulus et ce, aussi bien sur des oreilles ouvertes que fermées.

Ainsi, comme rappelé dans ce premier chapitre, nous avons vu que :

- L'oreille externe dispose en profondeur d'une partie osseuse,
- L'oreille externe a une fonction de transfert permettant l'amplification de certaines fréquences, notamment autour du 3 kHz,
- Lors de la vocalisation, un flux osseux est transmis au canal auditif externe (CAE) et que, si l'oreille est fermée, l'onde acoustique créée dans le CAE résonne, ce qui génère une autophonation passive,
- Ce phénomène est plus important pour le phonème [i],
- Le positionnement profond du Lyric semble atténuer fortement ce phénomène,
- Si on étend la loi de BOYLE et MARIOTTE à l'audioprothèse, une cavité résiduelle faible engendrerait une augmentation de la pression acoustique au tympan,
- L'Aurical FreeFit permet de mesurer la pression acoustique au tympan.

Nous avons donc mis au point un protocole permettant de vérifier si le positionnement profond d'un embout permet effectivement de réduire l'autophonation passive tout en préservant au mieux les performances ainsi que le confort de l'appareillage.

## Chapitre 2 - Protocole et réalisation des tests

### A) Objectifs du protocole

Pour évaluer l'influence de la profondeur d'un embout sur l'autophonation passive, nous avons choisi de mesurer le niveau sonore de l'autophonation, obtenu avec différentes profondeurs d'embouts donc plusieurs dimensions de cavité résiduelle, en utilisant la propre voix du patient comme stimulus.

Par ailleurs, nous avons cherché s'il existait des critères d'identification spécifiques ou plus prononcés chez les patients présentant un risque d'autophonation important :

- via les caractéristiques anatomiques de l'oreille,
- via le BING-TOO, test audiométrique subjectif facile, rapide et peu invasif.

Nous avons donc mis au point le protocole ci-dessous.

### B) Protocole

Le protocole que nous avons appliqué à chaque patient est le suivant :

- 1) Prise d'empreinte puis relevé des caractéristiques anatomiques :
  - a. La profondeur du conduit mesurée depuis la base du tragus,
  - b. La largeur de la tranche du conduit auditif à 9 mm,
  - c. La hauteur de la tranche du conduit auditif à 9 mm,
  - d. La circonférence du conduit auditif à 9 mm,
  - e. La longueur maximale et minimale de la partie osseuse.
- 2) Réalisation du test de BING TOO (BT) pour déterminer le seuil osseux avec vibreur positionné sur le front pour les fréquences 250 Hz et 500 Hz de 2 façons :
  - sans obstruer le CAE (CAE.O),
  - en obstruant le CAE à l'aide du casque d'audiométrie tonale (CAE.F).

Si  $|CAE.F - CAE.O| > 5$  dB sur 250 ou 500 Hz, alors le BING TOO est positif, ce qui indique un fort risque d'autophonation. Sinon, il est négatif, ce qui indique un risque faible. Nous avons cherché à valider ou infirmer la fiabilité de ce test.

- 3) Mesure de l'autophonation (CAE ouvert) sur un [i] à 65 dB émis par le patient. La sonde doit être à moins de 3 mm du tympan et l'on veillera à bien la scotcher car elle ne doit pas bouger durant toute la suite du protocole

qui consiste à :

- Couper l'empreinte à 3 mm en prenant en compte la taille du coton,
- Introduire l'empreinte préalablement coupée et ré-effectuer les mesures d'autophonation sur un [i] à 65 dB émis par le patient,
- Retirer et raccourcir l'empreinte de 2 mm dans le plan de la coupe précédente,
- Réintroduire l'empreinte et effectuer la mesure d'autophonation pour un [i] à 65 dB émis par le patient,
- Effectuer les opérations précédentes deux fois de plus, c'est-à-dire jusqu'à mesurer l'autophonation avec une cavité résiduelle de 9 mm.

Nous avons donc ainsi mesuré le niveau sonore au tympan du patient lorsque celui-ci prononce un [i] à 65 dB oreilles ouvertes et en faisant varier la longueur de la cavité résiduelle à 3, à 5, à 7 et à 9 mm.

Note : les mesures effectuées oreilles ouvertes nous serviront de référence pour mesurer l'autophonation (cf. Chapitre 2 - Protocole et réalisation des tests, F) Méthode d'interprétation).

## C) Matériel nécessaire

Le matériel nécessaire à la réalisation des tests est, en très grande partie, couramment présent en laboratoire d'audioprothèse, à savoir :

- Pour la prise d'empreinte, le matériel standard tel que l'otoscope et le pousse coton.  
Cependant, l'empreinte profonde nécessite également de prendre un coton avec un tube de décompression pour éviter de créer une aspiration du tympan en retirant l'empreinte.  
La pâte à empreinte utilisée est une pâte de 50 shore, recommandée par Starkey pour les empreintes profondes. De plus, elle est suffisamment fluide pour permettre de révéler les détails qui permettront l'évaluation des caractéristiques de l'anatomie du CAE (cf. Chapitre 2 - Protocole et réalisation des tests, B) Protocole).
- Pour le test du BING TOO, il s'agit du matériel standard d'audiométrie : un casque TDH39 ainsi qu'un vibreur tel que ceux utilisés pour réaliser une audiométrie en conduction osseuse. Il est également nécessaire d'avoir un logiciel d'audiométrie, dans notre cas il s'agit d'OTOSuite.

- Pour les mesures d'autophonation passive, nous avons utilisé l'Aurical Freefit, ainsi que son logiciel de mesure in-vivo associé (cf. Chapitre 1 – Rappels anatomiques et audioprothétiques, E) La mesure In-Vivo et l'Aurical FreeFit).

Il a également été nécessaire d'utiliser de l'huile d'amande douce afin de lubrifier le conduit auditif du patient pour pouvoir insérer et retirer plusieurs fois l'empreinte et effectuer ainsi les différentes mesures sans irriter ou risquer d'abîmer le CAE.

L'analyse de toutes ces données est effectuée sur tableur. Dans le cas présent, nous avons choisi le logiciel Excel.

## D) Choix des sujets

Nous avons volontairement essayé de retenir des critères de sélection de nos patients tests relativement larges afin d'avoir un maximum de mesures et une étude la plus fiable possible.

Malheureusement, les critères liés à la sécurité que nous décrivons plus loin ont compliqué la sélection des patients.

Par ailleurs, chez certains patients, seul un CAE remplissait les critères d'inclusion. Dans ce cas, nous avons effectué le protocole unilatéralement.

### a) Critères d'inclusion

Pour être intégrés au protocole, les patients devaient :

- Disposer d'un conduit auditif :
  - aux dimensions suffisantes pour effectuer précisément le positionnement de la sonde de mesure in-vivo,
  - dont la forme permet d'introduire et de retirer plusieurs fois l'empreinte.
- Etre capable de vocaliser un [i] à 65dB à l'aide du vumètre,
- Accepter de participer à l'étude.

Nous avons également essayé d'inclure un maximum de patients se plaignant d'autophonation.

## b) Critères d'exclusion

Il nous a été nécessaire de retenir des critères d'exclusion différents pour les patients sur lesquels nous allions réaliser ponctuellement des mesures audiométriques et pour ceux qui étaient destinés à essayer l'embout en conditions réelles, c'est-à-dire en port continu, sur une période beaucoup plus longue et sans contrôle permanent de l'audioprothésiste.

Ainsi, pour des raisons pratiques et préventives, nous avons exclu du test de mesures audiométriques :

- Les enfants,
- Les patients présentant une perforation tympanique,
- Les patients présentant une cavité d'évidement,
- Les patients atteints d'otites externes, d'eczéma,
- Les patients présentant une peau du conduit fine et/ou sèche,
- Les patients présentant des tympans non totalement visibles à l'otoscopie.

Quant aux patients qui devaient essayer l'embout profond, par mesure de sécurité nous avons décidé d'exclure ceux :

- Ayant subi une chimiothérapie au cours des 6 derniers mois,
- Ayant la peau sensible pour raisons médicales (radiothérapie de la tête ou du cou notamment),
- Atteints de diabète non contrôlé, d'immunodéficience ou suivant une thérapie anticoagulante,
- Atteints d'otites chroniques.

Dans ce second groupe, il a également été nécessaire d'émettre quelques critères de restriction audiolologique afin d'exclure les patients au profil auditif atypique :

- Plus de 60 dB de perte entre 250 et 1 kHz,
- Plus de 100 dB de perte à 6kHz,
- Audiogramme en pente inversée.

Malheureusement, pour des raisons de temps de fabrication et de coût d'achat, nous n'avons pas pu réaliser les essais d'embout profond sur l'ensemble des patients sélectionnés. Nous avons donc choisi les personnes les plus motivées parmi celles qui avaient une bonne dextérité.

## E) Passation du test

Comme détaillé ci-avant, plusieurs étapes ont été nécessaires à la réalisation de ce protocole : la prise d'empreinte, les mesures anatomiques, le BING TOO et la mesure d'autophonation, puis la réalisation de l'embout profond quand cela était possible.

### a) Prise d'empreinte

La prise d'empreinte est le geste le plus à risque que peut effectuer l'audioprothésiste. Il existe donc un certain nombre de précautions à prendre, quelle que soit la prise d'empreinte. Ici, nous avons travaillé sur des empreintes profondes, ce qui nécessite donc une attention extrême.

Par ailleurs, pour réaliser l'ensemble du protocole, nous avons besoin de réaliser une empreinte prenant l'intégralité du conduit auditif externe. Nous avons donc procédé ainsi :

1- Avant toute intervention, nous avons réalisé une otoscopie afin de vérifier l'état du tympan et du conduit auditif, mais également pour bien s'imprégner de la forme de celui-ci. Le but ici étant de visualiser comment positionner le coton contre le tympan et de prendre différents repères qui permettront par la suite de savoir si le coton était bien positionné.

L'otoscopie devait être particulièrement rigoureuse : une fois le coton en place, nous avons vérifié à l'otoscope qu'il couvrait bien tout le tympan.

Note : cela était d'autant plus important ici que, si la pâte à empreinte passait, ne serait-ce que très légèrement, derrière le coton, celle-ci se serait retrouvée sur le tympan, provoquant un risque majeur de lésion pour le patient lors de l'extraction de l'empreinte.

2- Nous avons positionné le coton avec tube de décompression (Starkey) contre le tympan pour réaliser l'empreinte souhaitée.

En cas de difficulté pour placer le coton, nous nous sommes aidés d'une sonde Lyric pour mesurer la profondeur du conduit auditif. Ainsi, il nous suffisait ensuite de mettre une marque sur le tube de décompression correspondant à la profondeur mesurée pour avoir une bonne indication.



Photo 5 : Sonde Lyric graduée

Note : la forme du coton pouvant varier à cause de la pression des parois du conduit auditif, au-delà du marquage expliqué précédemment, nous nous sommes fiés à notre ressenti, ainsi qu'à celui du patient.

Nous avons également veillé à mettre un lubrifiant sur le coton. Ainsi, pendant l'insertion de celui-ci, l'ensemble du conduit était bien lubrifié. Cela devait également permettre une extraction simplifiée de l'empreinte par la suite.

3- Une fois le coton placé, la pâte était injectée dans le conduit auditif du patient afin d'en réaliser l'empreinte.

4- On retirait ensuite délicatement l'empreinte en essayant de créer un maximum d'entrée d'air pour éviter de créer une aspiration du tympan, risque qui était atténué par l'effet du tube de décompression.



Photo 6 : Exemple d'empreinte profonde

## b) Tests

Sur chaque empreinte nous avons donc mesuré :

- a. La profondeur du conduit depuis la base du tragus,
- b. La largeur de la tranche du conduit auditif à 9 mm,
- c. La hauteur de la tranche du conduit auditif à 9 mm,
- d. La circonférence du conduit auditif à 9 mm,
- e. La longueur maximale et minimale de la partie osseuse.

Puis, nous avons effectué un BING TOO ainsi que les mesures d'autophonation passive comme décrit dans le protocole (Chapitre 2 - Protocole et réalisation des tests, b) Protocole).



Nous avons alors obtenu un BING TOO positif ou négatif selon les patients ainsi que les mesures d'autophonation passive dont voici ci-après les courbes :

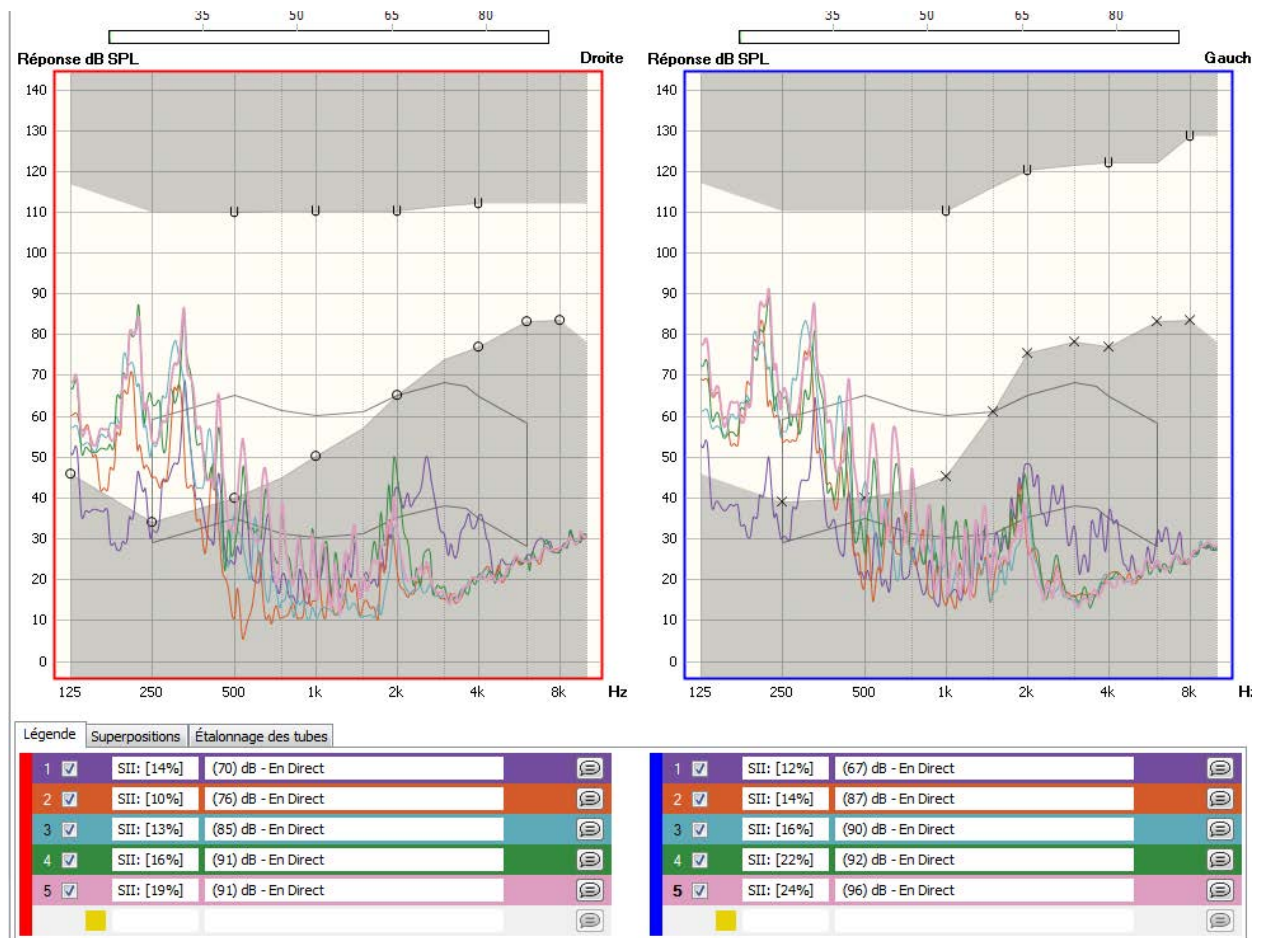


Figure 12 : Mesures d'autophonation

Nous avons pu y observer 5 courbes pour chaque oreille, chacune d'elles indiquant une mesure en dB SPL au tympan en fonction de chaque fréquence pour la même stimulation ([i] émis par le patient à 65 dB) :

- Courbe 1 (violette) : mesure d'autophonation oreilles ouvertes,
- Courbe 2 (orange) : mesure d'autophonation avec empreinte à 3 mm,
- Courbe 3 (bleu) : mesure d'autophonation avec empreinte à 5 mm,
- Courbe 4 (verte) : mesure d'autophonation avec empreinte à 7 mm,
- Courbe 5 (rose) : mesure d'autophonation avec empreinte à 9 mm.

Nous avons ensuite transféré les courbes sur tableur Excel afin de faire une analyse plus aisée et précise des données.

### c) Réalisation d'embouts profonds

L'essai de l'embout profond correspond à la finalité de ce mémoire, c'est-à-dire le test en conditions réelles. Malheureusement, pour des raisons de coût de fabrication et de temps de réalisation, l'embout profond n'a pas pu être réalisé pour chaque patient : la réalisation d'un embout profond nécessite une empreinte profonde or, lors du protocole nous devons couper l'empreinte. Pour avoir cette empreinte, il fallait donc en effectuer une deuxième ou réaliser l'embout avant d'effectuer le protocole.

De plus, l'embout profond n'est pas un modèle référencé chez les fabricants. Chaque embout devait donc être fabriqué à la main, sur la base d'un embout dit « brut » avec seulement le perçage du tube que nous demandions au fabricant.

Enfin, en réalisant à la main l'embout à la profondeur souhaitée, il faut veiller à avoir un maintien suffisant, notamment à l'aide du 2<sup>e</sup> coude, et, sur la base de l'empreinte :

- Creuser l'embout afin de pouvoir y placer l'écouteur que l'on montera sur tube,
- Vérifier que l'embout n'est pas traumatisant pour l'oreille : arêtes, pics, etc.,
- Placer, si besoin, un fil d'extraction et disposer l'écouteur monté sur tube en plaçant un point de colle sur le tube,
- Révérifier que rien n'est traumatisant pour l'oreille.

Autant d'étapes qui sont nécessaires pour obtenir, normalement, un embout stable et non traumatisant dans l'oreille.

Finalement, parmi l'ensemble des patients testés, seuls quelques un auraient pu utiliser un embout profond puisque, de par sa petite taille et son positionnement, il est difficile à manipuler.

Ainsi, afin d'améliorer la fiabilité du test, autant que possible dans la mesure de nos moyens, nous avons choisi de m'inclure dans ce test pendant une période de 4 mois.

## F) Méthode d'interprétation

Les tests effectués ont été analysés de la façon suivante :

- Interprétation du BING TOO : ce test permet de déterminer rapidement si un patient risque d'être sujet à l'autophonation passive ou non. Or il n'est pas couramment utilisé. Le but de son utilisation dans ce protocole était donc de juger de sa pertinence en conditions réelles. S'il s'avérait fiable, la rapidité de ce test pourrait, en effet, en faire un test très intéressant qui pourrait orienter l'audioprothésiste dans ses choix d'embouts pour ses patients.
- Mesures d'autophonation passives (APp) :
  - Celles effectuées sur l'oreille ouverte nous ont servi de référence. On considérera expérimentalement que cette valeur mesurée indique une absence d'autophonation car le patient ne se plaint normalement pas d'autophonation lorsqu'il ne porte pas ses appareils,
  - Celles effectuées avec les différentes cavités résiduelles correspondent aux valeurs les plus élevées que nous aurions certainement mesurées avec un embout. En effet, l'embout comble toute la partie extérieure du conduit auditif. Il y a alors très peu de fuites acoustiques et un maximum d'énergie peut donc se retrouver dans la cavité résiduelle. Nous nous sommes donc placés dans les conditions les plus défavorables possibles en termes d'autophonation.

Les différentes valeurs mesurées par l'Aurical Freefit ont été exportées du module d'in-vivo vers un tableur afin de permettre une meilleure analyse. Les valeurs ont alors été traitées en faisant la moyenne de la différence entre la mesure effectuée oreille fermée et oreille ouverte sur les bandes de fréquence suivantes : 125-250 Hz, 125-500 Hz, 125-2 000 Hz, 125-10 000 Hz, 500-2 000 Hz, 2 k-4 kHz et 4 k-10 kHz. Par souci de précision, parmi un grand nombre de données disponibles, nous avons choisi d'utiliser les mesures crêtes à crête qui sont plus faciles à relever et donc à étudier.

## Chapitre 3 – Analyse des données

Une fois l'ensemble des données recueillies et transférées sous tableur, nous avons pu procéder à leur analyse. Dans un premier temps, nous en verrons les mesures objectives, puis nous nous intéresserons au côté subjectif de l'étude.

### A) Mesures objectives

Après traitement des données, on obtient les tableaux suivants :

		125-250	125-500	125-2 k	125 – 10 k
Mesure d'APp (dB SPL) (valeur absolue)	OO	37	37	32	30
	3 mm	45	42	35	29
	5 mm	49	47	37	29
	7 mm	52	50	41	32
	9 mm	52	50	42	33
		500 – 2 k	2 k – 4 k	4 k – 10 k	
	OO	28	31	23	
	3 mm	28	20	20	
	5 mm	28	15	19	
7 mm	33	17	20		
9 mm	35	18	20		
		125-250	125-500	125-2 k	125 – 10 k
Différence moyenne d'APp OF-OO (dB SPL)	OO	0	0	0	0
	3 mm	8	5	3	-1
	5 mm	12	10	5	-1
	7 mm	15	13	9	2
	9 mm	15	13	10	3
		500 – 2 k	2 k – 4 k	4 k – 10 k	
	OO	0	0	0	
	3 mm	0	-11	-3	
	5 mm	0	-16	-4	
7 mm	5	-14	-3		
9 mm	7	-13	-3		

Tableau 4 : Lien entre l'autophonation passive, bande fréquentielle et cavité résiduelle

La première partie du tableau indique les mesures d'autophonation moyennes par bande de fréquence en fonction de la longueur de cavité résiduelle.

La seconde partie du tableau indique la valeur obtenue par soustraction de la valeur mesurée oreille ouverte (OO) de la mesure avec cavité résiduelle (OF) :

$$\text{valeur indiquée dans le second tableau} = OF - OO$$

Note : Les cases vertes correspondent aux valeurs d'autophonation oreilles fermées les plus proches de celles mesurées oreilles ouvertes.

Plus la valeur obtenue dans le tableur « différence moyenne d'APp OF-OO » est proche de zéro, plus la sensation d'autophonation ressentie devrait être faible.

Les mesures ont également été présentées sous forme de courbes (cf. partie suivante) afin de rendre l'analyse plus visuelle et de tracer les courbes de tendances.

### a) Analyse par bande fréquentielle

Les graphiques présentés ci-dessous indiquent la répartition de l'ensemble des valeurs obtenues par soustraction OF-OO par bande de fréquence en fonction de la taille de cavité résiduelle :

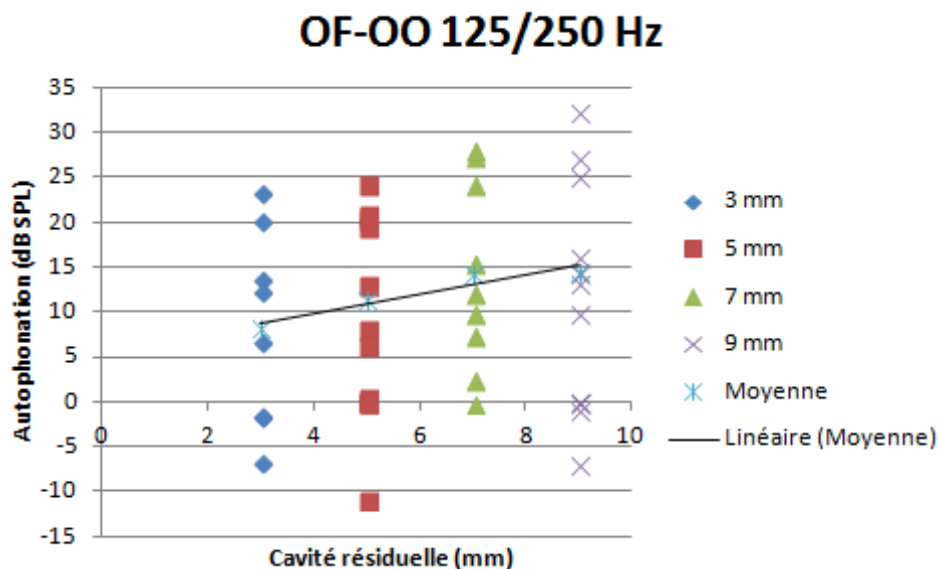


Figure 13 : Différence d'autophonation passive sur la bande 125/250 Hz

## OF-OO 125/500 Hz

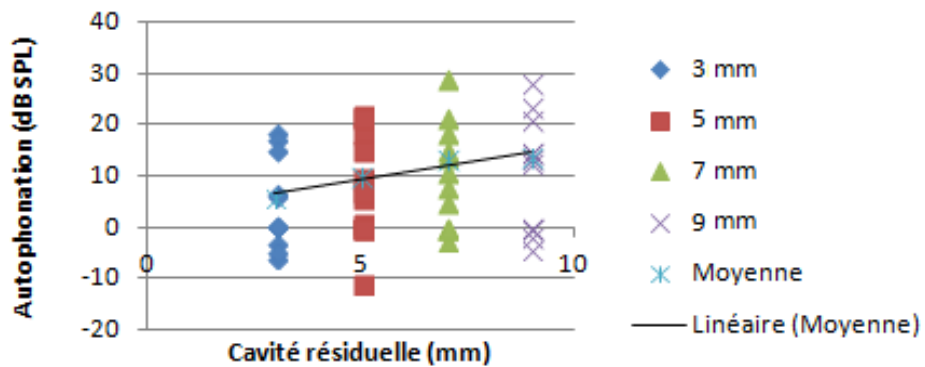


Figure 14 : Différence d'autophonation passive sur la bande 125/500 Hz

## OF-OO 125/2 kHz

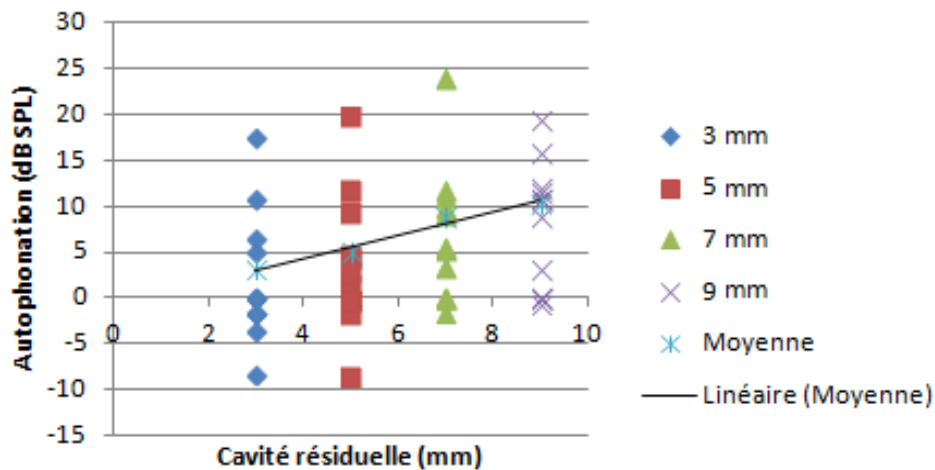


Figure 15 : Différence d'autophonation passive sur la bande 125/2 kHz

## OF-OO 125/10 kHz

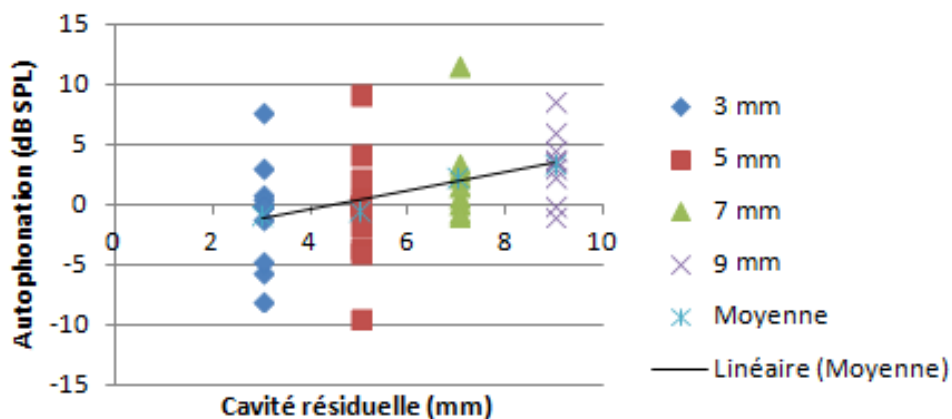


Figure 16 : Différence d'autophonation passive sur la bande 125/10 kHz

## OF-OO 500/2 kHz

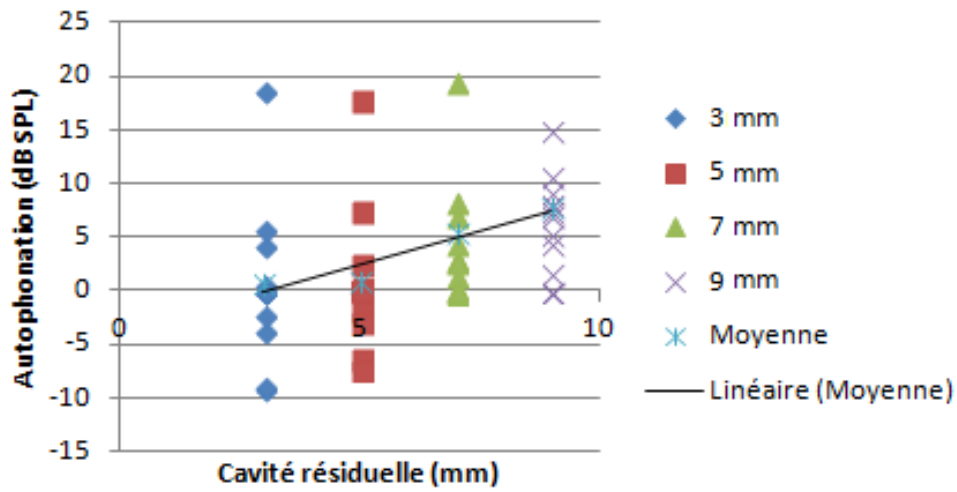


Figure 17 : Différence d'autophonation passive sur la bande 500/2 kHz

## OF-OO 2kHz/4kHz

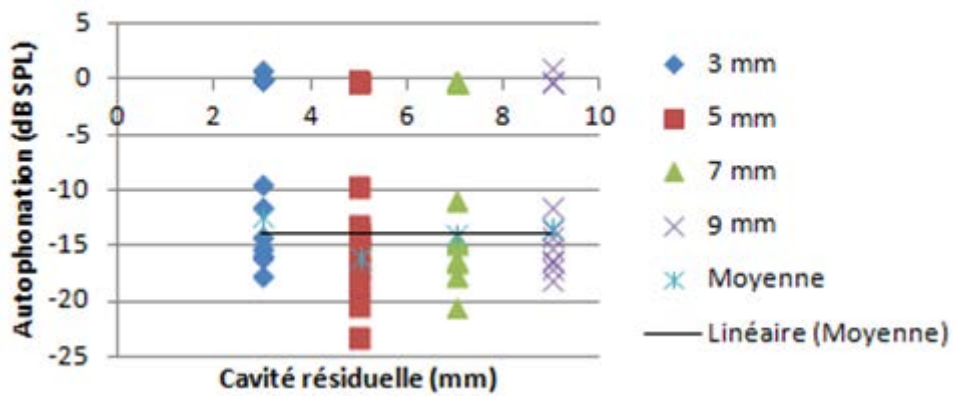


Figure 18 : Différence d'autophonation passive sur la bande 2 k/4 kHz

## OF-OO 4 kHz/10 kHz

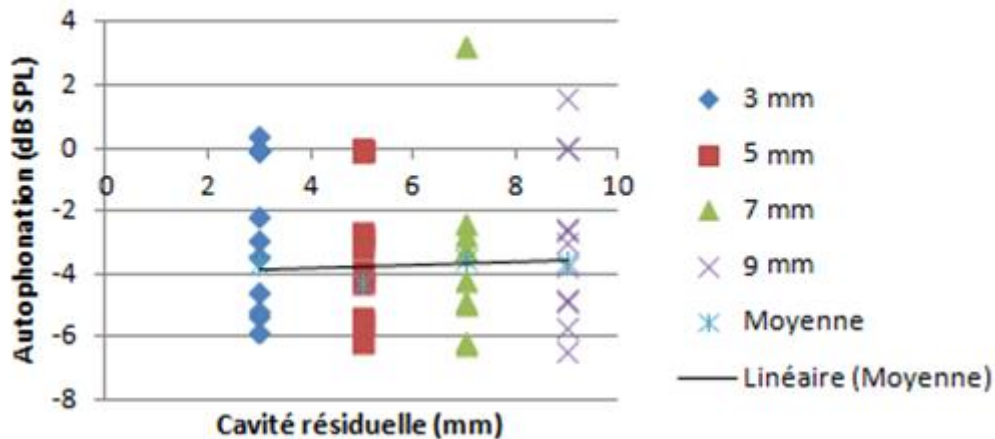


Figure 19 : Différence d'autophonation passive sur la bande 4 k/10 kHz

De façon générale, en traçant la courbe de linéarisation des moyennes des bandes de fréquences 125/250 Hz, 125/500 Hz, 125/2 kHz, 500/2 kHz et 125/10 kHz, nous avons remarqué que la différence entre les mesures effectuées oreilles ouvertes et fermées baisse en réduisant la cavité résiduelle. Nous en avons conclu que l'augmentation de la profondeur de l'embout a tendance à faire baisser l'autophonation passive.

De plus, même si l'écart-type est important, on constate que, pour ces bandes de fréquence, l'enveloppe des points a également tendance à aller dans le sens d'une baisse de l'autophonation passive grâce à l'augmentation de la profondeur de l'embout qui réduit la cavité résiduelle.

Par ailleurs, comme expliqué précédemment, l'analyse a été effectuée par calcul de la différence entre oreilles ouvertes et oreilles fermées. Les valeurs où le patient ressent le moins d'autophonation ont donc été celles où la valeur est la plus proche de zéro. La réduction de l'APp grâce à la profondeur d'embout est surtout visible pour les fréquences inférieures à 2 kHz.

Cependant, nous avons remarqué que sur les bandes 2/4 kHz et 4/10 kHz l'autophonation moyenne avait tendance à être identique en fonction des cavités résiduelles. Cela peut s'expliquer par 2 phénomènes :

- La fonction de transfert de l'oreille moyenne dont le maximum se situe entre 2 et 4 kHz (Cf : I - A) c), or, le rôle de l'oreille externe est supprimé par la présence de l'embout, il y a donc une suppression de la résonance à 3 kHz,



- Acoustiquement via la longueur d'onde :

$$\lambda = c * T = \frac{c}{f}$$

Si on prend la célérité dans l'air égale à 331 m.s<sup>-1</sup> et les fréquences de 4 et 10 kHz, on obtient respectivement des longueurs d'onde de 8,2 et 3,3 cm.

Donc si f augmente,  $\lambda$  diminue. Cela augmente l'influence des mouvements de la sonde lors des mesures car la distance entre le maximum et le minimum de pression acoustique est plus faible. Les mesures effectuées au-dessus de 4 kHz ne sont présentées qu'à titre indicatif.

Les mesures que nous venons de présenter peuvent également être analysées en fonction de l'autophonation moyenne et de la fréquence. Les résultats sont alors d'autant plus visibles.

### b) Autophonation moyenne

Le graphique suivant représente l'autophonation moyenne que nous avons mesurée en fonction de la fréquence et de la cavité résiduelle :

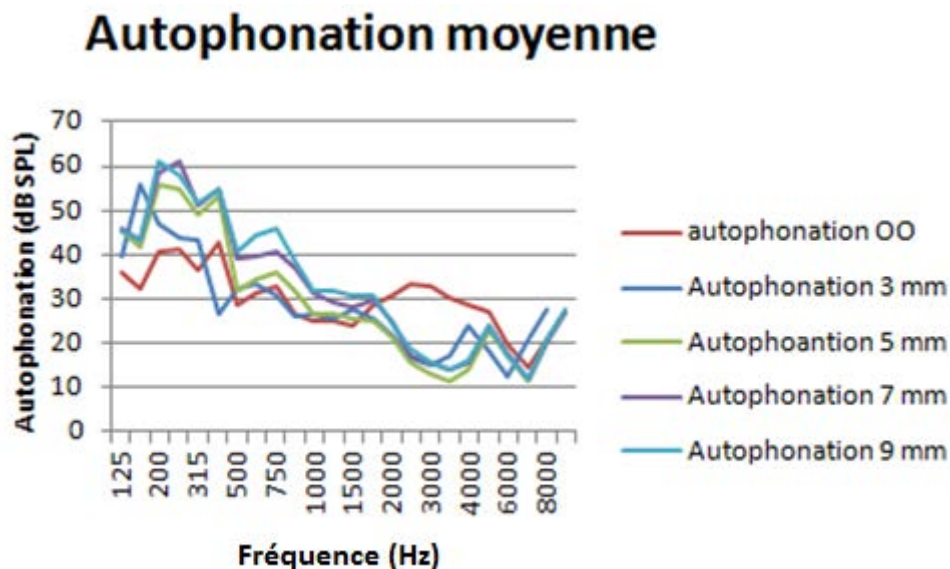


Figure 20 : Mesure de l'autophonation passive moyenne en fonction de la fréquence

Ce premier graphique nous a indiqué plusieurs choses :

- En-dessous de 2 000 Hz, l'autophonation oreille ouverte (OO) est globalement plus faible qu'OF. En effet, entre 125 et 2 kHz, la courbe rouge (autophonation oreille ouverte) se trouve majoritairement sous

les autres courbes,

- Il y a un pic d'autophonation entre 2 et 4 kHz qui est à son maximum à 3 kHz : c'est le pic de résonance naturelle de l'oreille ouverte,
- Le pic de résonance à 3 kHz disparaît dès lors qu'il y a un embout dans le conduit auditif, même si la cavité résiduelle est de 9 mm. Il s'agit de la perte d'insertion.

Le graphique suivant représente la différence moyenne d'autophonation entre l'oreille ouverte et fermée (OF-OO) en fonction de la fréquence et de la cavité résiduelle :

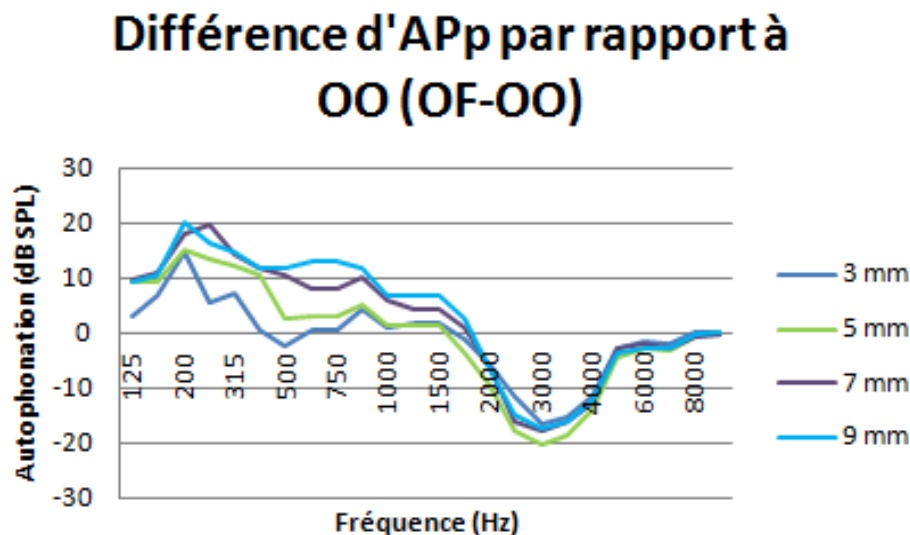


Figure 21 : Différence moyenne d'autophonation passive entre oreille fermée et ouverte en fonction de la fréquence

L'axe à l'ordonnée zéro ( $y=0$ ) représente ici l'absence d'autophonation oreille ouverte, donc normalement aucune sensation d'autophonation passive. Dès lors, plus la courbe est éloignée de l'axe des abscisses, plus la sensation d'autophonation est présente.

On remarque ici que :

- D'une façon générale, plus la cavité résiduelle est faible, plus l'embout est profond, plus on mesure une autophonation proche de l'autophonation naturelle oreille ouverte,
- La baisse d'autophonation est nettement plus visible en basses fréquences qu'en hautes fréquences,
- La perte d'insertion est ici très visible,
- Au-dessus de 4 kHz, la différence d'autophonation entre les différentes cavités résiduelles est quasi nulle. Attention toutefois à la fiabilité du test dans ces fréquences (cf. 3 - A) a) Analyse par bande de fréquences).

### c) Influence de l'anatomie

Durant ce travail, nous avons mesuré plusieurs caractéristiques anatomiques de chaque CAE, notamment :

- La profondeur du conduit depuis la base du tragus,
- La largeur de la tranche du conduit auditif à 9 mm,
- La hauteur de la tranche du conduit auditif à 9 mm,
- La circonférence du conduit auditif à 9 mm,
- La longueur maximale et minimale de la partie osseuse.

Le but de ces mesures était d'essayer de déterminer des critères anatomiques facilement identifiables permettant de détecter des sujets potentiellement plus soumis à l'autophonation passive.

Pour cela, parmi les CAE de l'étude, nous avons sélectionné ceux ayant plus d'autophonation que la moyenne.

Nous nous sommes donc basés sur la différence d'autophonation passive mesurée entre l'oreille fermée et l'oreille ouverte sur les bandes de fréquences 125-250 Hz, 125-500 Hz et 125-2 000 Hz car :

- L'autophonation passive est plus présente en basses fréquences,
- Les basses fréquences sont moins sources d'erreurs de mesure (car la longueur d'onde est plus grande),
- Les basses fréquences permettent d'établir 2 groupes de patients dont les mesures sont bien distinctes, comme le montre le tableau suivant qui compare l'autophonation mesurée chez les patients les moins sujets à l'autophonation passive et les patients qui y sont les plus sujets, en fonction de la bande de fréquence et de la profondeur de la cavité résiduelle.

Bandes de fréquences	Profondeur cavité résiduelle	Autophonation moyenne sur les CAE les plus sujets à l'autophonation passive	Autophonation moyenne chez les CAE les moins sujets à l'autophonation passive
125-250	3	14	5
	5	18	8
	7	21	6
	9	22	9
125-500	3	12	6
	5	17	7
	7	20	7
	9	20	8
125-2 000	3	8	5
	5	9	5
	7	13	4
	9	14	6

Tableau 5 : Valeurs moyennes d'APp mesurées chez les sujets présentant beaucoup et peu d'APp

On constate ici une grande différence d'APp entre les groupes de CAE sélectionnés. Ce choix semble donc être pertinent.

Remarque : sur ces conduits, l'embout profond permet de faire chuter nettement l'autophonation passive.

Une fois que nos 2 groupes de CAE ont été constitués, nous avons comparé les mesures citées précédemment.

Les informations recueillies sont répertoriées dans le tableau ci-après :

Les valeurs indiquées sont les moyennes mesurées en cm	CAE présentant beaucoup d'APp	CAE présentant peu d'APp
profondeur du conduit	24,5	23,5
largeur de la tranche du conduit auditif à 9 mm	0,6	0,6
hauteur de la tranche du conduit auditif à 9 mm	1,0	0,8
circonférence du conduit auditif à 9 mm	2,9	2,7
longueur maximal de la partie osseuse	1,4	1,3
longueur minimal de la partie osseuse	1,0	1,0

**Tableau 6 : Tableau comparatif des mesures anatomiques entre sujets présentant beaucoup et peu d'APp**

Nous n'avons pas remarqué de différence particulière entre les 2 groupes de CAE. Nous avons donc pu en déduire, de façon expérimentale, que parmi les critères sélectionnés, aucun ne pouvait indiquer un risque significatif d'autophonation et qu'il fallait donc chercher une autre façon d'identifier ces patients.

#### d) Analyse du BING TOO

Pour cette analyse, nous avons repris le même groupe de CAE que précédemment. Cette fois-ci, nous avons remarqué une nette différence, soit en moyenne :

- 25 dB (+/-4,5 dB) pour les CAE présentant beaucoup d'autophonation,
- 16,5 dB (+/-3 dB) pour les CAE ne présentant pas beaucoup d'autophonation.

Théoriquement, le BING-TOO est dit positif si  $|CAE.F - CAE.O| > 5$  dB. Mais, dans la pratique, il est apparu que le bruit de fond dans la cabine augmente la valeur mesurée CAE.O car il produit un effet de masquage bilatéral. Il s'est donc avéré qu'une différence de 5 dB n'est pas une valeur seuil adaptée.

Déterminer un seuil adapté de façon standardisée ne m'a pas paru possible car celle-ci dépend du bruit de fond de chaque cabine. Cette valeur doit donc être établie dans chaque laboratoire sur un panel d'oreilles relativement conséquent pour être fiable. Dans la cabine où nos mesures ont été effectuées, la valeur seuil était d'environ 20 dB.

Nous avons également noté que le BING-TOO:

- Est un indicateur intéressant mais ne constitue en rien une vérité absolue car sa précision dépend de facteurs extérieurs,
- Est rapide à effectuer,
- Est peu invasif,
- Ne nécessite pas de matériel spécifique.

### e) Cas pratique

Pour présenter un exemple concret, voici le cas d'un patient chez qui il aurait été intéressant de faire un essai d'embout profond. Le sujet C1 présentait un BING-TOO de 25 dB.

Le tableau ci-dessous permet de comparer la différence d'autophonation passive entre l'oreille ouverte et fermée en passant d'une cavité résiduelle de 9 à 3 mm chez le sujet C1 :

Bande de fréquence (en Hz)	Différence d'APp entre une cavité résiduelle de 9 et de 3 mm en dB SPL	
	Oreille droite	Oreille gauche
125-250	13	8
125-500	14	8
125-2 000	14	8

**Tableau 7 : Différence d'APp entre une cavité résiduelle de 9 et 3 mm par bande de fréquence (cas pratique)**

On constate ici une baisse de 13 à 14 dB SPL sur l'oreille droite et de 8 dB SPL sur l'oreille gauche en passant d'une cavité résiduelle de 9 à 3 mm. En termes de sonie, cela engendre une différence remarquable.

Chez le patient C1, on observe donc une résonance oreille fermée beaucoup plus proche de l'oreille ouverte si on a une cavité résiduelle de 3 mm au lieu de 9 mm.

La cavité résiduelle, directement liée à la profondeur d'embout, semble donc avoir un rôle très important sur l'autophonation passive. On peut alors se poser la question de savoir si d'autres critères peuvent également avoir une influence.

## f) Autres critères possibles

Par analogie avec l'acoustique au sens large, on pourrait imaginer que d'autres facteurs tels que la texture du conduit auditif ou encore ses dimensions influencent l'autophonation, c'est ce que nous allons voir maintenant.

### 1. La texture du conduit auditif, influence théorique

En acoustique du bâtiment, plus un matériau est épais, poreux et souple, plus l'absorption en basse fréquence est importante. [24]

On sait également que, lorsque l'onde sonore rencontre un matériau, la majorité de son énergie est généralement réfléchi, une partie est transmise au travers des matériaux et une partie est absorbée. [25]

On peut donc imaginer que la texture de la peau influence l'autophonation car plus la peau absorbe d'énergie acoustique, plus l'énergie transmise au tympan sera faible.

### 2. Les dimensions / la longueur du conduit auditif, influence théorique

Comme vu précédemment (cf. chapitre 1 – A c)), les fréquences des ondes stationnaires du conduit auditif sont déterminées par la formule suivante :

$$L = (2n - 1) * \frac{\lambda}{4}$$

Or :

$$\lambda = c * T = \frac{c}{f}$$

Avec :

- $c$ , la célérité de l'onde en  $\text{m.s}^{-1}$ ,
- $T$ , la période de l'onde  $\text{s}^{-1}$ ,
- $f$ , la fréquence de l'onde en Hertz,

On déduit donc que :

$$f = (2n - 1) * \frac{c}{4L}$$

Donc, plus  $L$  diminue, plus la fréquence minimum pouvant induire une onde stationnaire augmente.

Exemple :

Nous avons vu que, pour une tube ouvert de 2,5 cm la fréquence de la première harmonique est d'environ 3 310 Hz.

Si on ré-effectue le même calcul avec un tube de 0,8 cm on obtient :

$$1 * \frac{331}{4 * 0,8 * 10^{-2}} = 10\,344 \text{ Hz}$$

On constate donc que dans le cas de la cavité de 2,5 cm, la fréquence de résonance est clairement dans le spectre audible, alors que, dans le cas de la cavité de 0,8 cm, la résonance se fait dans des fréquences bien supérieures qui ne sont plus perceptibles pour beaucoup de malentendants au niveau sonore de l'autophonation. On peut donc dire que plus la cavité résiduelle d'un conduit est grande, plus sa fréquence de résonance sera grave.

De façon générale, un conduit auditif long tendra à créer une cavité résiduelle plus grande et donc une fréquence de résonance plus basse ce qui induit qu'elle sera plus facilement perceptible car présente dans le spectre audible.

On peut donc dire que, de façon théorique, un conduit auditif long aura tendance à favoriser l'autophonation.

Si on se place maintenant dans un cas propre à l'audioprothèse, on doit considérer un tube fermé d'un côté par une paroi indéfiniment rigide symbolisant l'embout, et de l'autre, une paroi souple représentant le tympan.

La paroi souple est représentée par un système masse-ressort tel que représenté sur la figure suivante.



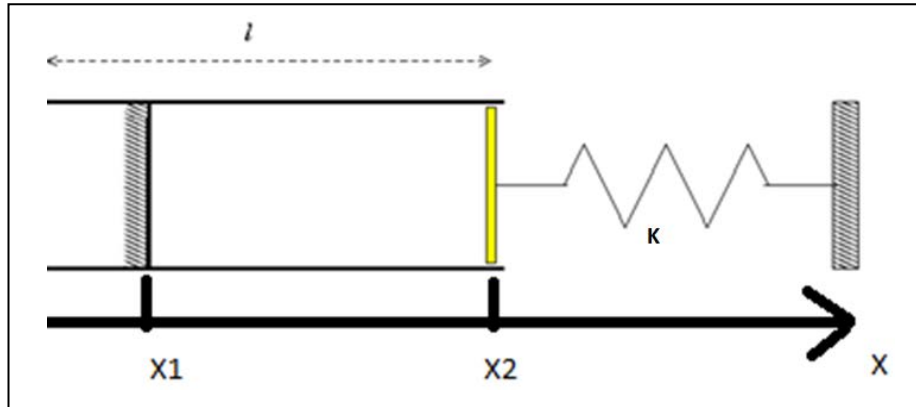


Figure 22 : Système masse-ressort représentant l'oreille externe

- $Z_m$  : impédance mécanique du système masse-ressort (tympan)
- $z_1$  : impédance acoustique spécifique de la partie infiniment rigide en  $x=x_1$
- $z_2$  : impédance acoustique spécifique du système masse-ressort en  $x=x_2$
- $K$  : raideur du ressort
- $k$  : nombre d'onde
- $m$  : masse du système masse-ressort
- $c$  : célérité du son
- $S$  : surface de la section du cylindre
- $\rho$  : masse volumique du milieu
- $\omega$  : pulsation propre
- $f'$  : frottement

En appliquant le théorème de l'impédance acoustique spécifique rapportée, on obtient en  $x=x_2$  pour  $z_2$

$$z_2 = \frac{z_1 - j \cdot \tan(k \cdot l)}{1 - j \cdot z_1 \cdot \tan(kl)}$$

Or  $z_1$  tend vers l'infini car on considère que l'embout réfléchit totalement les ondes acoustiques. Dans ce cas, on peut dire :

$$z_2 = \frac{z_1}{-j \cdot z_1 \cdot \tan(kl)}$$

$$z_2 = \frac{j}{\tan(kl)}$$

Note :  $Z_m = \frac{\text{Force}}{\text{vitesse}} = \frac{S \cdot \text{pression}}{\text{vitesse}}$  et  $z = \frac{\text{pression}}{\rho \cdot c}$

Ainsi, par identification avec l'impédance mécanique du système tympanique (masse-ressort), on obtient :

$$Z_m = f' + j \left( m\omega - \frac{K}{\omega} \right) = S \cdot \rho \cdot c \cdot z^2$$

En remplaçant les différents termes, on obtient :

$$0 = f' + j \left( m \cdot \omega - \frac{K}{\omega} - \frac{S \cdot \rho \cdot c}{\tan(Kl)} \right)$$

S'il y a résonance, c'est que la partie imaginaire est nulle donc :

$$m \cdot \omega - \frac{K}{\omega} - \frac{S \cdot \rho \cdot c}{\tan(kl)} = 0$$

Or :

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Donc :

$$m \cdot 2 \cdot \pi \cdot f - \frac{K}{2 \cdot \pi \cdot f} - \frac{S \cdot \rho \cdot c}{\tan(kl)} = 0$$

$\tan(kl)$  étant faible, on peut approximer  $\tan(kl) \cong kl$  (approximation basses fréquences). Dans ce cas, on obtient :

$$f^2 = \frac{1}{(2\pi)^2} \left( \frac{K + \frac{S \cdot \rho \cdot c^2}{l}}{m} \right)$$

La fréquence de résonance de la cavité résiduelle en fonction de sa longueur, en incluant la rigidité du tympan est :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K + \frac{S \cdot \rho \cdot c^2}{l}}{m}}$$

On peut donc tracer le graphique suivant correspondant en prenant :

- Raideur du tympan,  $k = 3\,000\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ ,
- Surface du tympan,  $S = 80\text{ mm}^2$ ,
- Densité volumique de l'air,  $\rho = 1,3\text{ kg/m}^3$ ,
- Célérité du son,  $c = 331\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- Masse du tympan,  $m = 6\text{ mg}$ .

Note : il s'agit de données pouvant être utilisées pour caractériser un système masse ressort symbolisant le système tympano-ossiculaire. Ces données varient pour chaque individu.

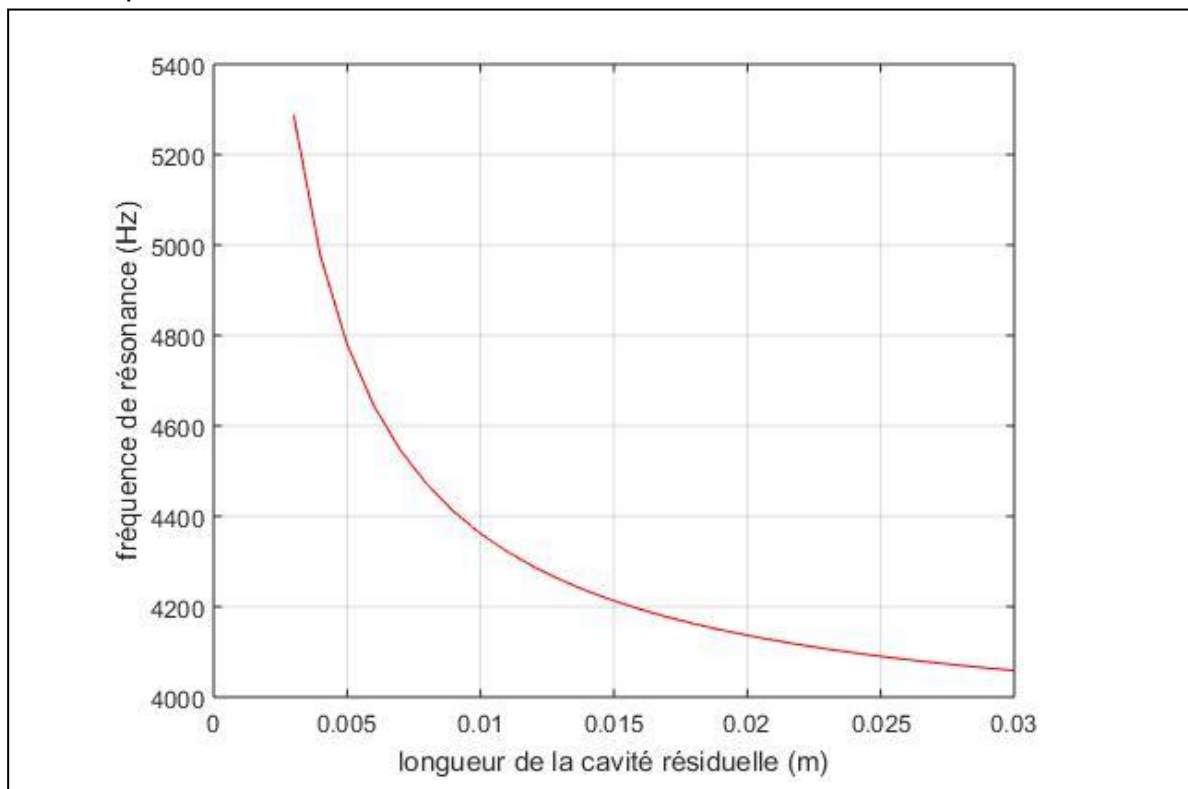


Figure 23 : Fréquence de résonance de la cavité résiduelle en fonction de sa longueur

Même si cela est moins vrai dans les conditions décrites précédemment, on constate donc que, pour un tube classique, plus la cavité résiduelle est grande, plus la fréquence de résonance est basse.

À l'inverse, plus la cavité résiduelle est faible, plus la fréquence de résonance est aiguë.

Or, on remarque aussi que la majorité des pertes auditives est plus importante dans les fréquences aiguës. La résonance sera donc moins perçue par le patient si elle a lieu dans des fréquences aiguës.

## B) Mesures subjectives

Après avoir validé le test en utilisant des mesures réalisées via le module in-vivo, nous avons dû tester d'autres paramètres tels que le confort et l'utilisation.

La difficulté lors de ces tests subjectifs est de savoir si le patient utilise bien ses appareils pour ne pas introduire de biais.

Par souci de sécurité (manipulation d'embout rigide à 3 mm du tympan), de temps de réalisation et de coût financier, l'embout n'a pu être testé en situation réelle que sur 4 oreilles (2 patients). Cela est trop faible pour que le résultat puisse être présenté, d'autant que nous n'étions pas certains de la neutralité du résultat car seul l'embout à 3 mm du tympan a pu être testé.

Etant donné la faiblesse de l'échantillon testé, nous avons choisi de présenter uniquement les résultats de mon expérience de port d'embout profond qui a duré 4 mois.

Il serait donc nécessaire de ré-effectuer ce test sur un plus grand échantillon de personnes pour pouvoir généraliser ou non les constatations.

Les résultats décrits ci-dessous n'étant basés que sur ma propre perception, leur fiabilité est relative ; ils sont donc à prendre à titre indicatif.

### a) Test

J'ai moi-même testé le port d'un appareil auditif à embout profond durant 4 mois.

J'ai choisi d'effectuer ce test avec un embout totalement occlus car, étant normo-entendant, cet embout me placera dans la situation la plus défavorable et donc la plus intéressante à analyser.

J'ai également testé un double dôme fermé et un embout fond de conque pour avoir des points de comparaison.

## b) Mise en place

- Par rapport au dôme : la mise en place de l'embout profond est plus facile car il est réalisé sur mesure. Il est donc aisé de sentir si le placement est bon. Toutefois, il faut faire attention à ne pas forcer au risque d'occasionner une gêne, voire une douleur si l'axe n'est pas le bon ou s'il est trop profondément enfoncé,
- Par rapport à l'embout fond de conque : la mise en place de l'embout profond est plus compliquée car l'axe d'insertion peut porter à confusion. On notera également qu'il est plus facile de se tromper de côté sur un embout profond. En effet, même si cela serait très inconfortable voire douloureux, il est possible d'introduire le mauvais embout profond dans l'oreille, mais pas de placer un embout fond de conque du mauvais côté.

On notera donc que la mise en place n'est pas forcément plus difficile que pour un embout fond de conque ou un dôme. Il faudra toutefois veiller à ce que l'éducation prothétique soit bien intégrée.

L'embout profond est par contre à proscrire chez les patients ayant des problèmes de manipulation ou de dyspraxie sous risque de blessures.

## c) Confort

Le confort est un élément primordial pour la réussite d'un appareillage.

Les 3 éléments déterminants pour le confort sont l'acceptation physique pour l'oreille externe, la sensation d'autophonation et l'effet d'occlusion.

- Par rapport au dôme fermé : dans mon cas, le dôme était extrêmement inconfortable. Il était source de démangeaisons, de frissons et d'irritations, voire de douleurs. Ces désagréments ne sont pas apparus sur l'embout profond. L'autophonation et la sensation d'occlusion n'étaient présentes dans aucun des deux cas,
- Par rapport à l'embout fond de conque : l'acceptation physique de l'embout fond de conque est plus facile que l'embout profond. Cependant, l'effet d'occlusion est bien plus important. La sensation d'autophonation est également beaucoup plus présente.

Globalement, l'embout profond est plus confortable que l'embout fond de conque et le dôme. D'autre part, l'embout profond engendre nettement moins d'autophonation que l'embout fond de conque.

Note : le dôme était pour moi clairement insupportable, mais ce n'est pas le cas chez la majorité des patients.

# Conclusion

Le but de ce mémoire était de confirmer ou d'infirmer le bénéfice de l'embout profond sur l'autophonation passive.

Nous avons également cherché à valider un examen rapide et pratique permettant de détecter les patients à risque.

Pour cela, nous avons réalisé successivement des mesures in-vivo d'autophonation oreille ouverte, puis avec une cavité résiduelle de 3, 5, 7 et 9 mm. La mesure oreille ouverte nous sert de référence.

Même si les tests ont été effectués sur un ensemble restreint de patients, les résultats correspondaient à nos attentes :

- Plus la cavité résiduelle est faible, moins il y a d'autophonation passive,
- Cela est vrai pour toutes les fréquences mesurées (125 à 10 kHz),
- Le résultat est plus marqué en basses fréquences car c'est là que se situe la majorité de l'autophonation,
- Les mesures au-dessus de 4 000 Hz n'étaient pas fiables.

Il semble donc que l'embout profond apporte un réel bénéfice aux patients atteints d'autophonation passive.

Cependant, l'embout profond nécessite une prise d'empreinte profonde, geste qui est plus difficile à réaliser qu'une empreinte classique. Nous avons donc cherché différents critères anatomiques et/ou audiométriques mettant en avant un patient avec un risque élevé d'autophonation.

Pour cela, sur la base des mesures d'autophonation effectuées précédemment, nous avons mis en place 2 groupes de CAE : un avec beaucoup et un avec peu d'autophonation passive.

Pour chaque groupe, nous avons ensuite quantifié différentes caractéristiques anatomiques notamment : la longueur du conduit, la tranche à 9 mm, la circonférence à 9 mm et les longueurs de la partie osseuse.

Les résultats n'ont pas permis de mettre en avant le rôle d'un facteur anatomique. Cependant, on peut imaginer qu'un conduit auditif long entraînera une cavité résiduelle longue avec un embout standard et favorisera donc l'autophonation passive.

Il est également probable qu'un conduit dont la peau est molle tend à baisser l'autophonation passive.

En revanche, le test BING-TOO semble, lui, être un élément intéressant. En effet, on retrouve une nette différence entre les 2 groupes de patients.

Par contre, si la théorie nous explique que le test est dit positif si l'on mesure un delta de 5dB, dans la pratique, celui-ci doit être plus important et tenir compte de la cabine pour obtenir un résultat significatif.

Selon les 4 mois d'essais, les tests de confort et de manipulation semblent être satisfaisants, mais, pour valider ce point, ils devraient être réalisés à plus grande échelle.

L'embout profond semble en tout cas apporter un réel avantage pour les patients sujets à l'autophonation passive.

Son usage reste cependant difficile : pour le moment, il ne devra donc être utilisé qu'en cas de nécessité. Pour déterminer les cas de patients chez qui il apporterait un maximum de bénéfice, le test BING-TOO semble être un bon indicateur.

Par ailleurs, la prise d'empreinte nécessaire à la réalisation de l'embout profond est encore difficile. Néanmoins, elle tend à se faciliter grâce à un nouveau protège tympan, l' « EasyView Otoblock », développé par Phonak, qui permet de déposer le protège tympan avec l'otoscope en gardant une vue sur le tympan. Cela facilite grandement la prise d'empreinte profonde et rend donc l'embout profond beaucoup plus accessible.

Ainsi, s'il reste aujourd'hui anecdotique dans la gestion de l'autophonation passive, l'embout profond semble tenir ses promesses en matière de performances et de confort. Parallèlement, les progrès en matière de sécurisation de l'empreinte profonde le rendront certainement bientôt bien plus attractif qu'il ne l'est aux yeux des autoprothésistes. Ce serait alors une nouvelle solution particulièrement intéressante pour les patients souffrant d'autophonation passive.

# Bibliographie

## Ouvrages, rapports et mémoires :

[1] Collège National d'Audioprothèse, *Précis d'Audioprothèse*, « L'appareillage de l'adulte - Le contrôle d'efficacité prothétique » Tome III, 2006 :

- [1a] page 212,
- [1b] page 210,
- [1c] page 219,
- [1d] page 225,
- [1e] page 221.

[2] GRESSIER T., « Influence du positionnement de l'appareil Lyric dans le conduit auditif sur l'autophonation passive », Université de Rennes 1, 2016.

[15] DE CECCO T., « Etude comparative entre les RITE (Receiver In The Ear) avec micro-embouts ou dômes ouverts, en situation bruyante », Université de Rennes 1, 2011, pages 22 à 25.

## Articles :

[10] DODELE L., « Les corrections acoustiques de la courbe de réponse », *Les cahiers de l'Audition*, Volume 26, Septembre/Octobre 2013, p. 7.

[11] PURIA S., ROSOWSKI J.-J., « Bekesy's contributions to our present understanding of sound conduction to the inner ear », novembre 2012.

[21] VAN VLIET D., Au.D. & GALSTER J. A., Ph.D., « Les intra-auriculaires profonds invisibles (IIC) », 2010.

## Conférence :

[22] GRESSIER T., « Comparaison de 3 conduits parmi 17 testés », soutenance de mémoire, Université de Rennes, 2016.



**Sites internet (10/09/2017) :**

- [3] [www.vulgaris-medical.com/encyclopedie-medicale/oreille](http://www.vulgaris-medical.com/encyclopedie-medicale/oreille)
- [4] [www.neuroreille.com/promenade/francais/ear/exear/exear.html](http://www.neuroreille.com/promenade/francais/ear/exear/exear.html)
- [5] [www.mon-audition.info/glossaire](http://www.mon-audition.info/glossaire)
- [6] [www.cochlea.eu/oreille-generalites/oreille-externe](http://www.cochlea.eu/oreille-generalites/oreille-externe)
- [7] [www.schoolmouv.fr/definitions/frequence-fondamentale/definition](http://www.schoolmouv.fr/definitions/frequence-fondamentale/definition)
- [8] [www.grasp.ulg.ac.be/nvdw/NVdw/Documents\\_files/14.ondes\\_stationnaires.pdf](http://www.grasp.ulg.ac.be/nvdw/NVdw/Documents_files/14.ondes_stationnaires.pdf), p12.
- [9] [www.blog-audioprothesiste.fr/effet-docclusion/](http://www.blog-audioprothesiste.fr/effet-docclusion/)
- [12] [www.cochlea.eu/exploration-fonctionnelle/methodes-objectives](http://www.cochlea.eu/exploration-fonctionnelle/methodes-objectives)
- [13] <http://research.jyu.fi/phonfr/17.html>
- [14] [www.marraire.com/Segolena/SigNotionPhon.html](http://www.marraire.com/Segolena/SigNotionPhon.html)
- [16] [www.silveraudition.ch/fr/shop--shop\\_interne.html?cat=347](http://www.silveraudition.ch/fr/shop--shop_interne.html?cat=347)
- [17] [www.interson-protac.com/3.65628.embouts.html](http://www.interson-protac.com/3.65628.embouts.html)
- [18] [www.phonakpro.com/fr/fr/products/hearing-aids/lyric/overview-lyric.html](http://www.phonakpro.com/fr/fr/products/hearing-aids/lyric/overview-lyric.html)
- [19] [www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-loi-boyle-mariotte-14107/](http://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-loi-boyle-mariotte-14107/)
- [20] [www.metaphysik.fr/manuel/index.php?id=3010202](http://www.metaphysik.fr/manuel/index.php?id=3010202)
- [23] [www.otometrics.com/fr-FR/solutions/aurical/freefit#top](http://www.otometrics.com/fr-FR/solutions/aurical/freefit#top)
- [24] [www.acouphile.fr/materiaux.html](http://www.acouphile.fr/materiaux.html)
- [25] [www.acouphile.fr/absorbtion-reverberation.html](http://www.acouphile.fr/absorbtion-reverberation.html)

# Table des illustrations

Figure 1 : Le pavillon .....	2
Figure 2 : Schématisation du canal auditif externe.....	3
Figure 3 : Coupe d'une oreille .....	4
Figure 4 : Fonction de transfert de l'OE.....	5
Figure 5 : Flux vibratoire avec et sans embout.....	8
Figure 6 : L'impédancemétrie .....	9
Figure 7 : Exemples de tympanométries .....	9
Figure 8 : Triangle vocalique .....	12
Figure 9 : Plage d'application du Lyric.....	16
Figure 10 : Loi de BOYLE et MARIOTTE .....	17
Figure 11 : Comparaison de la directivité de l'IIC, du contour et de l'oreille nue .....	18
Figure 12 : Mesures d'autophonation.....	28
Figure 13 : Différence d'autophonation passive sur la bande 125/250 Hz .....	32
Figure 14 : Différence d'autophonation passive sur la bande 125/500 Hz .....	33
Figure 15 : Différence d'autophonation passive sur la bande 125/2 kHz.....	33
Figure 16 : Différence d'autophonation passive sur la bande 125/10 kHz.....	33
Figure 17 : Différence d'autophonation passive sur la bande 500/2 kHz.....	34
Figure 18 : Différence d'autophonation passive sur la bande 2 k/4 kHz.....	34
Figure 19 : Différence d'autophonation passive sur la bande 4 k/10 kHz.....	35
Figure 20 : Mesure de l'autophonation moyenne en fonction de la fréquence .....	36
Figure 21 : Différence moyenne d'autophonation passive entre oreille fermée et ouverte en fonction de la fréquence .....	37
Figure 22 : Système masse-ressort représentant l'oreille externe.....	44
Figure 23 : Fréquence de résonance de la cavité résiduelle en fonction de sa longueur .....	46
Tableau 1 : Volume de la cavité résiduelle moyenne en fonction de l'embout auriculaire .....	10
Tableau 2 : Modes et lieux d'articulation des phonèmes .....	11
Tableau 3 : Comparaison de l'autophonation de 3 conduits parmi 17 testés avec différents positionnements de Lyric.....	19
Tableau 4 : Lien entre l'autophonation passive, bande fréquentielle et cavité résiduelle.....	31
Tableau 5 : Valeurs moyennes d'APp mesurées chez les sujets présentant beaucoup et peu d'APp .....	39
Tableau 6 : Tableau comparatif des mesures anatomiques entre sujets présentant beaucoup et peu d'APp .....	40
Tableau 7 : Différence d'APp entre une cavité résiduelle de 9 et 3 mm par bande de fréquence (cas pratique) .....	41

Photo 1 : Exemples de différents types de dômes .....	13
Photo 2 : Différents types d'embouts auriculaires .....	14
Photo 3 : Appareil Phonak Lyric .....	15
Photo 4 : Aurical FreeFit.....	20
Photo 5 : Sonde Lyric graduée .....	26
Photo 6 : Exemple d'empreinte profonde .....	27

Signature du maître de mémoire, précédée de la mention « lu et approuvé »

M. HAEBERLE

Vu le : 4 Octobre 2017

lu et approuvé

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized initial 'H' followed by a series of loops and a horizontal stroke.

## Impact de la profondeur d'embout sur l'autophonation passive

Soutenue le 09/11/2017

Par Romain HERF

### RESUME

Depuis plusieurs années, les fabricants d'aides auditives développent un grand nombre de traitements numériques censés améliorer le confort du patient. Cependant, certains modes d'appareillages intra-auriculaires récents, analogiques, disposés en fond de conduit offrent des performances impressionnantes.

Nous nous sommes donc intéressés au lien entre l'autophonation passive et la profondeur d'embout dans le but de mettre au point un embout profond.

Nous avons également cherché comment mettre en avant les patients chez qui le risque d'autophonation passive est important.

### MOTS CLES

AUTOPHONATION PASSIVE    EMBOUT    RESONNANCE    EMPREINTE PROFONDE  
BING-TOO    IN VIVO    CONDUIT AUDITIF

Maître de mémoire	Intitulé du laboratoire	Nature
Julien HAEBERLE	Audition B&H	Expérimentale
		Bibliographique *
		Thème 6

### Thèmes

1 – Sciences Fondamentales

2 – Hygiène / Environnement

3 – Médicament

4 – Alimentation – Nutrition

5 – Biologie

6 – Pratique professionnelle