

**UNIVERSITE PARIS SUD**  
**MEMOIRE DE MASTER 2 SCIENCES CHIRURGICALES**  
**PARCOURS REGENERATION, REPARATION ET REMPLACEMENT**

**Représentation mentale de la cochlée et ses conséquences dans  
l'insertion des électrodes intracochléaires**

Présentée par

**Victor Renato TORRES LAZO**

**Année universitaire 2013-2014**

**Laboratoire UMR-S 1159**

**Réhabilitation chirurgicale mini-invasive et robotisée de l'audition**

Encadrants :

Yann Nguyen, Evelyne Ferrary  
Directeur : Olivier Sterkers  
UMR-S 1159 INSERM  
Université Paris 6 Pierre et Marie Curie



*À Claudia  
À Leonardo,*

*pour son soutien indéfectible  
et inconditionnel*

## **Remerciements**

Cette mémoire n'aurait pas été possible sans l'accueil du Professeur Olivier Sterkers au sein de son équipe. Elle aurait été sans tenue sans le soutien, les précieux éclaircissements et la lecture minutieuse du Docteur Evelyne Ferrary. Sans direction sans l'aide et les conseils du Docteur Yann Nguyen.

## Résumé

L'implant cochléaire est un appareil électronique ayant comme objectif de réhabiliter l'audition chez les personnes avec une surdité endocochléaire sévère à profonde. Une chirurgie atraumatique permet d'atteindre des meilleurs résultats et de conserver l'audition résiduelle. Dans la chirurgie, l'absence de repères visuels de la cochlée peut faire difficile la représentation mentale de l'axe d'insertion et avoir des conséquences sur les forces d'insertion et translocation du porte-électrode. Seize chirurgiens (experts=3, CCA=7, internes=6) ont été évalués sur 5 rochers synthétiques dans lesquels, la voie d'abord, la mise en place de 4 marqueurs fiduciaires et un cône-beam ont été réalisés. Nous avons évalué : la localisation du point d'entre à la cochlée par rapport à la fenêtre ronde et l'approximation de l'axe d'insertion du chirurgien avec l'axe d'insertion idéal. La position de l'instrument par rapport au rocher a été évaluée avec le Digipointeur. Ainsi, la reproductibilité de l'axe d'insertion a été évaluée plusieurs fois dans un rocher et sur un angle fixe sur un bloc en bois pour le même chirurgien. Dix rochers humains traités comme les rochers synthétiques et un modèle de cochlée microdisséquée a été réalisée. Des insertions dans différents axes (idéal et ceux de l'approximation des trois groupes des chirurgiens) avec un outil motorisé manipulé par le système Digipointeur/Robot où la mesure des forces d'insertion et la translocation du porte-électrode ont été évalués. Nos résultats montrent que les experts ont significativement une meilleure approximation à l'axe idéal dans les plans axial et coronal ( $7 \pm 1,5^\circ$  et  $-6 \pm 1,5^\circ$ ) que les CCA ( $14 \pm 1,7^\circ$  et  $-13 \pm 1,7^\circ$ ) et les internes ( $15^\circ \pm 1,5^\circ$  et  $-17 \pm 1,9^\circ$ ). La localisation du point d'entrée à une grande variabilité, étant la fenêtre ronde la localisation la plus choisie ( $n=42$  ; 53%). La variabilité de l'axe d'insertion sur un rocher a été plus grande que celle trouvée sur un angle fixe sur un bloc en bois mesurée 40 fois dans les plans axial et coronal ( $10 \pm 0,5^\circ$  et  $7 \pm 0,3^\circ$  vs  $3 \pm 0,1^\circ$  et  $1 \pm 0,1^\circ$ ). Au final, la représentation mentale est dépendante de l'expérience chirurgicale mais elle a une grande variabilité individuelle et interindividuelle dû à l'absence des repères visuels de la cochlée pendant la chirurgie. Les conséquences de la mauvaise représentation n'ont pas été évaluées en raison d'une adaptation pas obtenue avec le système outil d'insertion/Digipointeur/Robot pour atteindre une précision suffisante. Dans le futur, une modélisation de l'axe d'insertion et des structures intracochléaires permettrait d'optimiser l'insertion du porte-électrodes adapté à chaque patient.

**Mots clés :** Implantation cochléaire, représentation mentale, axe d'insertion, robotique, mesure d'effort

UMR-S 1159 « Rehabilitation chirurgicale mini-invasive et robotisée de l'audition »

## Abstract

A cochlear implant is an electronic device that provides hearing in people with severe and profound deafness. Atraumatic surgery achieves better results and preserves residual hearing. In surgery, the absence of visual cues of the cochlea can complicate mental representation of the insertion axis and alter the insertion forces as well as the translocation of the electrode array. Sixteen surgeons were evaluated on five synthetic temporal bones (experts = 3, CCA = 7, residents= 6) in which the surgical approach was conducted and four fiducial markers and CT-cone-beam performed. The evaluation developed as follows: the location of the entry point to the cochlea related to the round window niche and the approximation of the insertion axis by the surgeon to the optimal insertion axis. Instrument position relative to the temporal bone was assessed with Digipointeur system. Thus, reproducibility of the insertion axis was assessed repeatedly by the surgeon in one temporal bone in a fixed angle on a wood block. Ten human temporal bones were treated as synthetic ones and a model of microdissected cochlea was created. The measurement of the insertion forces and the translocation of the electrode system were then evaluated in the insertions performed in different axes (optimal axis and those of the three surgeon groups) with a tool manipulated by Digipointeur / Robotol systems. Our results show that experts have significantly better approximation of the ideal axis in the axial and coronal planes ( $7 \pm 1.5^\circ$  and  $-6 \pm 1.5^\circ$ ) than the CCA ( $14 \pm 1.7^\circ$  and  $-13 \pm 1.7^\circ$ ) and than residents ( $15 \pm 1.5^\circ$  and  $-17 \pm 1.9^\circ$ ). The location of the entry point shows great variability, the round window being the most chosen site ( $n = 42$ ; 53%). The variability of the insertion axis on temporal bone was greater than that found at a fixed angle on a wood block measuring 40 both in axial and coronal planes ( $10 \pm 0.5^\circ$  and  $7 \pm 0.3^\circ$  vs  $1 \pm 0.1^\circ$  and  $3 \pm 0.1^\circ$ ). In the end, the mental representation is dependent on surgical experience but has a great individual and inter-individual variability due to the lack of visual cues in the cochlea during surgery. The consequences of poor performance were not evaluated due to the insufficient accuracy of adaptation in the system insertion tool / Digipointeur / Robotol. In the future, a modeling of the insertion axis and intracochlear structures would optimize the insertion of the electrode array for every patient.

**Key words:** Cochlear implantation, mental representation, insertion axis, neuronavigation, force measurement

UMR-S 1159 « Rehabilitation chirurgicale mini-invasive et robotisée de l'audition »

# Sommaire

<b>I. INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
I.1. RAPPEL ANATOMIQUE .....	1
<i>I.1.1. Oreille moyenne</i> .....	1
<i>I.1.2. Oreille interne et la cochlée</i> .....	1
I.2. IMPLANTATION COCHLEAIRE .....	2
<i>I.2.1. Définition et réhabilitation de la surdité</i> .....	2
<i>I.2.2. Technique chirurgicale</i> .....	3
<i>I.2.3. Préservation de l'audition et implant cochléaire</i> .....	5
<b>II. OBJECTIFS</b> .....	<b>6</b>
<b>III. MATERIEL ET METHODES</b> .....	<b>7</b>
III.1 CHIRURGIENS .....	7
III.2 ROCHERS SYNTHETIQUES .....	7
III.3. EVALUATION DU POINT D'ENTREE A LA COCHLEE PAR LES CHIRURGIENS.....	8
III.4 EVALUATION DE LA REPRESENTATION MENTALE DE L'AXE D'INSERTION PAR LES CHIRURGIENS.....	8
III.5 EVALUATION DE LA REPRODUCTIBILITE DE L'AXE D'INSERTION .....	9
III.6 ROCHERS HUMAINS ET INSERTION DU PORTE-ELECTRODES .....	9
III.7 DIMENSIONS DE LA COCHLEE .....	10
III.8 MESURE DES FORCES D'INSERTION ET ESTIMATION DE LA TRANSLOCATION .....	10
III.9 STATISTIQUES .....	11
<b>IV. RESULTATS</b> .....	<b>12</b>
IV.1 EVALUATION DE LA REPRODUCTIBILITE DE L'AXE D'INSERTION.....	12
IV.2 EVALUATION DE LA REPRESENTATION MENTALE DE L'IMPLANTATION COCHLEAIRE .....	12
<i>IV.2.1 Point d'entrée au tour basal de la cochlée</i> .....	12
<i>IV.2.2 Erreur dans représentation de l'axe d'insertion</i> .....	13
IV.3 TEMPS EFFECTIF POUR REPRESENTER L'AXE D'INSERTION .....	15
IV.4 COMPARAISON DE L'AXE D'INSERTION ET LE POINT D'ENTREE AU TOUR BASAL DE LA COCHLEE .....	15
<b>V. DISCUSSION</b> .....	<b>16</b>
V.1 VALIDATION DE L'AXE THEORIQUE .....	17
V.2 VALIDATION DE LA CONCEPTION DE L'AXE D'INSERTION.....	17
V.3 VALIDATION DES GROUPES DES CHIRURGIENS.....	17
V.4 POINT D'ENTREE AU TOUR BASAL DE LA COCHLEE .....	18
V.5 ERREUR DE REPRESENTATION DE L'AXE D'INSERTION .....	18
<b>VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>19</b>
<b>VII. REFERENCES</b> .....	<b>20</b>

# I. Introduction

## I.1. Rappel anatomique

### I.1.1. Oreille moyenne (Fig. 1A)

L'oreille moyenne est constituée par la mastoïde, la caisse du tympan et la trompe d'Eustache.

La mastoïde est remplie de cellules aériennes qui communiquent avec la caisse du tympan par l'additus ad antrum. La mastoïde est limitée :

- à sa partie supérieure par le tegmen mastoïdien qui la sépare de la fosse cérébrale moyenne ;
- à sa partie inférieure par le bulbe jugulaire, les muscles sterno-cléïdo-mastoïdien et digastrique ;
- à sa partie postérieure par le labyrinthe postérieur (canal semicirculaire latéral), la fosse cérébrale postérieure et le sinus sigmoïde ;
- à sa partie latérale par la région musculo-cutanée de la région arrière de l'oreille ;
- à sa partie antérieure par la caisse du tympan, la troisième portion du nerf facial et la paroi postérieure du conduit auditif externe.

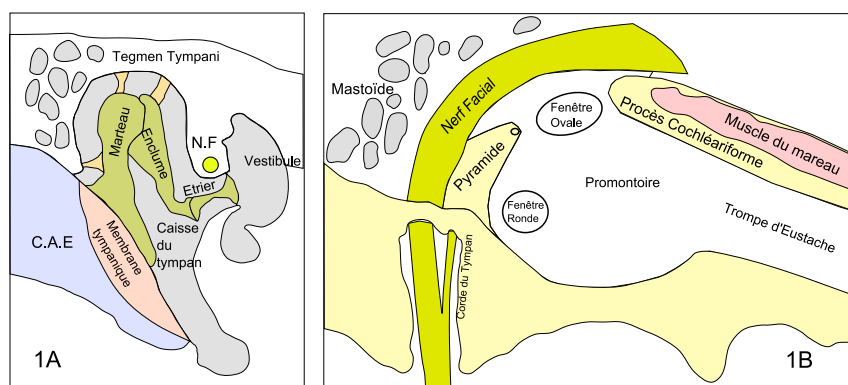


Figure 1A. Représentation de l'oreille moyenne (coupe coronale). 1B. Schéma de la caisse du tympan (vue sur le promontoire).

La caisse du tympan (Fig. 1B) est une structure creuse qui contient les osselets (marteau, enclume et étrier). Elle est constituée de six faces ou parois :

- antérieure : la trompe d'Eustache ;
- supérieure : le tegmen tympani ;
- postérieure : la pyramide et le sinus tympani et plus profondément la portion mastoïdienne du nerf facial ;
- inférieure : l'hypotympan et le golfe de la jugulaire ;
- latérale : la membrane tympanique ;
- mediale : la deuxième portion du nerf facial et le muscle du marteau (épitympanum) et le promontoire (saillie du tour basal de la cochlée), le nerf de Jacobson, la fenêtre ovale et la fenêtre ronde.

La trompe d'Eustache est une structure qui maintient une fonction adéquate de l'oreille moyenne. Elle est composée d'une portion osseuse (le tiers proximal) et une portion cartilagineuse (les deux tiers distal) avec une longueur de 3 cm. Dans sa partie inférieure se trouve l'artère carotide interne et à sa partie supérieure le muscle du marteau et s'ouvre dans le nasopharynx dans la fosse de Rosenmüller. Elle est tapissée d'un épithélium cilié pseudostratifié. Son ouverture est réalisée de façon active contrôlée par trois muscles : le péristaphylin interne, le péristaphylin externe et le salpingo-pharyngien.

### I.1.2. Oreille interne et la cochlée (Fig. 2)

L'oreille interne est incluse dans la partie pétreuse du rocher. Elle comprend la cochlée, le vestibule, les trois canaux semicirculaires, le conduit et le sac endolymphatique.

La cochlée constitue le labyrinthe antérieur ; elle est enroulée chez l'homme sur 2,5 tours de spire (2,2 – 2,9) (Erixon et al. 2009). Elle est en relation avec l'oreille moyenne par l'intermédiaire de deux fenêtres :

- en arrière et en haut, la fenêtre ovale, lieu d'attache de la platine de l'étrier par le ligament annulaire. La fenêtre ovale est entourée dans sa partie supérieure et postérieure par le nerf facial ;
- en arrière et en bas, la fenêtre ronde dont la membrane sépare la caisse du tympan de la rampe tympanique.

A l'intérieur de la capsule osseuse, le labyrinthe membraneux délimite trois espaces : la rampe cochléaire qui contient l'endolymphe (riche en potassium), la rampe vestibulaire (supérieure) et la rampe tympanique (inférieure), ces deux dernières rampes contenant la périlymphe (riche en sodium). La membrane de Reissner sépare les rampes vestibulaire et cochléaire, la membrane basilaire sépare les rampes cochléaire et tympanique.

La communication entre les espaces périlymphatiques (rampes vestibulaire et tympanique) se produit à l'apex de la cochlée par l'hélicotréma. La paroi latérale de la cochlée est composée de la strie vasculaire et du ligament spiral qui sont des structures qui maintiennent la balance ionique de l'endolymphe. La limite interne est constituée par la lame spirale.

L'organe de Corti est une structure complexe composée des cellules de support de trois rangées de cellules ciliées externes et une rangée des cellules ciliées internes. Les cellules ciliées internes sont les récepteurs de l'audition et les cellules ciliées externes sont des modulateurs répondant aux fréquences avec une réponse électromotrice active.

Au centre de la cochlée, le canal de Rosenthal contient le ganglion spiral avec des neurones afférents et efférents. Les cellules ganglionnaires de type I (90%) sont des neurones qui reçoivent les afférences provenant des cellules ciliées internes (afférences multiples pour sur une cellule ciliée interne). Les cellules de type II innervent les cellules ciliées externes (plusieurs cellules ciliées externes pour une même fibre nerveuse).

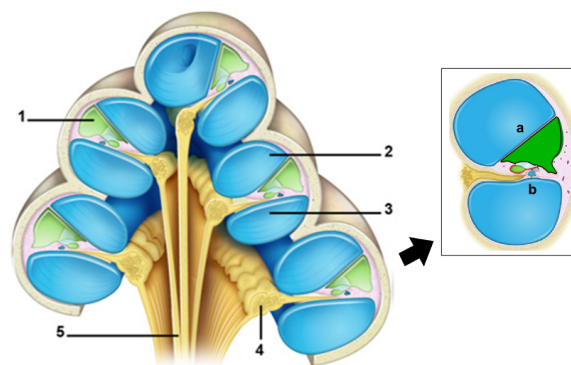


Figure 2. Schéma de la cochlée (coupe coronale). 1 : Rampe cochléaire, 2 : Rampe vestibulaire, 3 : Rampe tympanique, 4 : Ganglion spiral, 5 : Nerf cochléaire. Coupe transversale sur le tour basal de la cochlée (encadré). a : Membrane basilaire, b : Membrane de Reissner.

## I.2. Implantation cochléaire

### I.2.1. Définition et réhabilitation de la surdité

En décembre 2012, environ 324 000 patients ont été implantés dans le monde. L'implant cochléaire est un appareil électronique ayant comme objectif de réhabiliter l'audition chez des personnes ayant une surdité sévère à profonde d'origine endocochléaire pour lesquels les aides auditives conventionnelles n'apportent aucun bénéfice. L'implant cochléaire stimule électriquement les cellules bipolaires du ganglion spiral. Les personnes implantées retrouvent dans la grande majorité des cas une audition utile pour la compréhension de la parole, des sons ambiants et peuvent très souvent assurer une conversation par téléphone (Fig. 3).

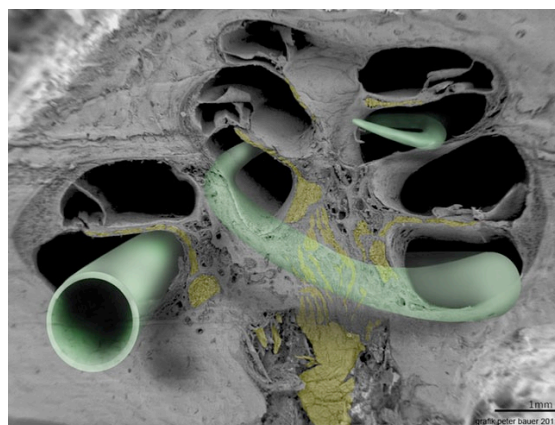


Figure 3. Représentation d'une coupe coronale de la cochlée avec la représentation d'une porte électrode en place (en vert) dans la rampe tympanique. D'après Martinez-Monedero et al., 2011.



## 1.2.2. Technique chirurgicale

L'implantation cochléaire a trois étapes : la réalisation de la voie d'abord, l'ouverture cochléaire et l'insertion du porte-électrodes.

### 1.2.2.1 Voie d'abord

Son objectif est d'exposer la région de la fenêtre ronde pour réaliser l'ouverture cochléaire et l'insertion du porte-électrodes dans la cochlée. C'est une voie d'abord classique en otologie et largement connue (Goodhill 1977). Elle est constituée de deux étapes clés : la mastoïdectomie et la tympanotomie postérieure.

La mastoïdectomie (Fig. 4A) est une procédure chirurgicale qui consiste en l'ouverture des cellules mastoïdiennes avec l'aide des fraises de différentes tailles. La mastoïdectomie réalisée pour l'implantation cochléaire est plus petite que celle habituellement réalisée pour l'otite moyenne chronique. La région du conduit auditif externe doit être affinée pour permettre un bon angle de vision sur la région de la fenêtre ronde et sans altérer l'intégrité de la paroi postérieure du conduit auditif externe, ainsi évitant l'extrusion du porte-électrodes par la peau du conduit auditif externe. La région du tegmen mastoïdien doit être affinée pour permettre une meilleure visibilité. Il est important de laisser les rebords de la cavité pour retenir une partie du porte-électrodes qui va rester dans la mastoïde.

La tympanotomie postérieure (Fig. 4B) consiste en la dissection du récessus facial pour accéder à la caisse du tympan et la région de la fenêtre ronde. La taille du récessus facial est constante selon l'âge (Bielamowicz et al. 1988). Le monitoring du nerf facial est utilisé habituellement avec l'enregistrement électromyographique pendant la dissection du récessus facial et le fraisage de la région de la fenêtre ronde (Leonetti et al. 1990). Etant des limites de la tympanotomie postérieure, à sa partie postérieure la troisième portion du nerf facial, à sa partie inférieure la corde du tympan et à sa partie latérale l'annulus tympanique. Pendant la réalisation de la tympanotomie postérieure, il faut respecter l'annulus tympanique pour éviter la contamination et la communication avec le conduit auditif externe qui peut aboutir dans une infection ou la formation d'un cholestéatome dans la période postopératoire.

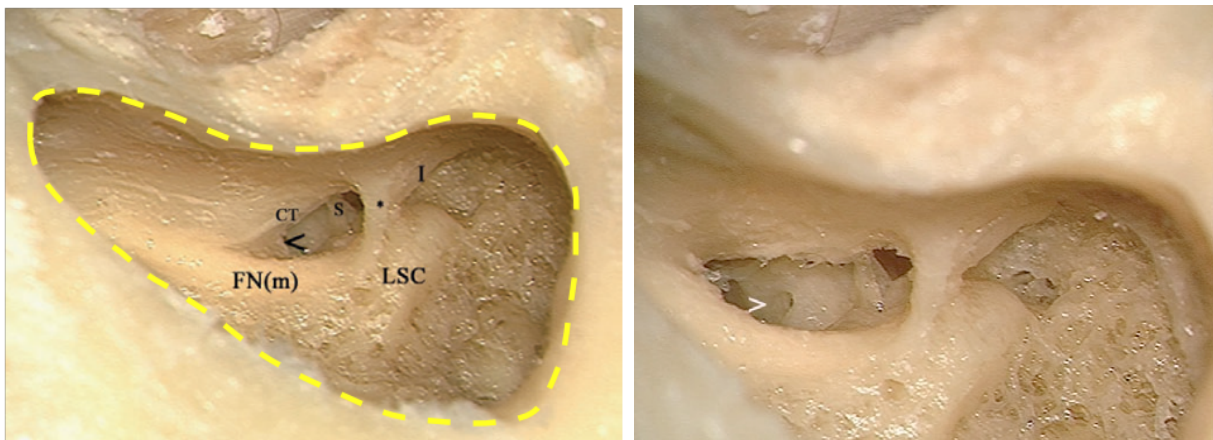


Figure 4A. Mastoïdectomie (entouré avec une ligne jaune pointillée) et le début de la tympanotomie postérieure. 4B Vue centre sur la tympanotomie postérieure. FN(m) : portion mastoïdienne du nerf facial, LSC : canal semicirculaire latéral, I : enclume, CT : corde du tympan, S : étrier, < ou > : fenêtre ronde. D'après Sanna and Khrais 2011

### 1.2.2.2 Ouverture cochléaire

Pour insérer le porte-électrodes dans la rampe tympanique, il faut ouvrir la cochlée. L'ouverture cochléaire peut se faire soit par une cochléostomie ou par la fenêtre ronde. La visualisation correcte de la région de la fenêtre ronde est essentielle et une ouverture cochléaire à l'aveugle peut endommager les structures intracochléaires (Adunka et al. 2007).

Cochléostomie : une fois correctement visualisé la fenêtre ronde. Une cochléostomie antéro-inférieure ou inférieure est plus performante pour accéder à l'axe de la rampe tympanique (Meshik et al. 2010). Une cochléostomie dans la partie supérieure ou antérieure de la fenêtre ronde peut endommager la lame spirale osseuse ou entraîner une entrée directe du porte-électrodes dans la rampe vestibulaire. Pour réaliser la cochléostomie, le fraisage du promontoire est réalisé et une cochléostomie idéale doit respecter l'endoste pour éviter un traumatisme intracochléaire et l'entrée de la poudre d'os dans la cavité cochléaire.

Fenêtre ronde : après la visualisation de la fenêtre ronde, une bonne exposition de la membrane de la fenêtre ronde est souhaitable. Le fraisage des sourcils postéro-supérieur et antéro-inférieur va permettre la correcte visualisation de la membrane de la fenêtre ronde. Cette approche a l'avantage d'éviter le fraisage et l'ouverture accidentelle de l'endoste et permettant l'approche directe de la rampe tympanique (Fig. 5). Par contre, la partie horizontale cachée de la membrane de la fenêtre ronde est près de la lame spirale osseuse (0,1 mm), cette distance augmente lorsqu'on est au centre de la membrane (1 mm) (Franz et al., 1987). Par ailleurs, la présence de la crista fenestra peut rétrécir l'entrée directe à la rampe tympanique. L'ouverture de la membrane de la fenêtre ronde est réalisée dans sa partie antérieure avec un instrument coupant.

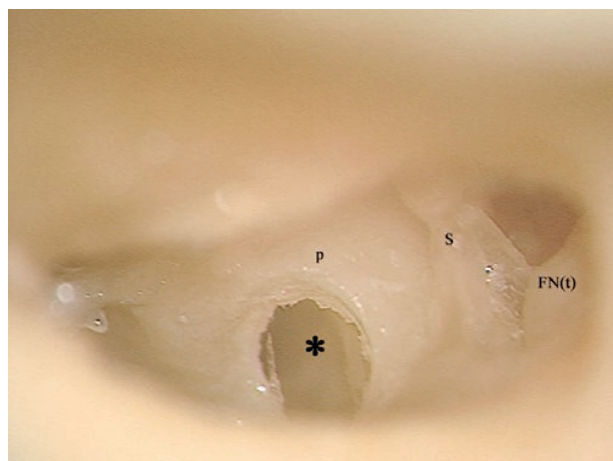


Figure 5. Ouverture cochléaire sur la fenêtre ronde. FN(t) : portion tympanique du nerf facial, S : étrier, P : promontoire, \* : ouverture cochléaire. D'après Sanna and Khrais 2011

### 1.2.2.3. Insertion du porte-électrodes

Après l'ouverture cochléaire, l'insertion du porte-électrodes est réalisée de façon différente selon le type d'implant. Une description des portes électrodes est fournie dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques des porte-électrodes actuellement sur le marché.

Modèle	Longueur (mm)	# d'électrodes	Forme	Surface	Ø proximal (mm)	Ø distal (mm)
<b>Advanced Bionics</b>						
<i>Hifocus 1J</i>	24,5	16	Préformée	Lisse	0,8	0,4
<i>Hifocus Helix</i>	24,5	16	Périmodiolaire	Lisse	1,1	0,6
<i>Hifocus V</i>	17,5	16	Préformée	Lisse	0,65	0,52
<b>Cochlear</b>						
<i>Nucleus 24</i>	N/C	22	Droite	Lisse	0,6	0,4
<i>Contour Advance<sup>1</sup></i>	17	22	Périmodiolaire	Lisse/crénelé	0,8	0,5
<i>Hybrid S</i>	10	6	Droite	Lisse	0,4	0,2
<i>Hybrid L</i>	16	22	Droite	Lisse	0,5	0,35
<i>MRA<sup>2</sup></i>	17	22	Périmodiolaire	N.C	0,6/0,52 <sup>3</sup>	0,3
<i>SRA<sup>2</sup></i>	25	25	Droite	Lisse	0,6	0,3
<b>MED-EL</b>						
<i>Standard</i>	31,5	12	Droite	Lisse	1,3	0,5
<i>Moyen</i>	24	12	Droite	Lisse	0,8	0,5
<i>Court</i>	15	12	Droite	Lisse	0,8	0,5
<i>Flexsoft</i>	31,5	12	Droite	Lisse	1,3	0,3
<i>FlexEAS</i>	34	12	Droite	Lisse	0,8	0,3
<b>Neurelec</b>						
<i>Digisonic SP</i>	25	20	Droite	Crénelé	0,94	0,5
<i>Prototype</i>	24,1	20	Droite	Lisse	0,5	0,4

1 : Le porte-électrodes Contour Advance® présente une surface lisse en dehors et une surface crénelée en dedans. 2 : Modiolar Research Array. 3 : Le porte-électrode possède une chemise externe amovible à sa partie proximale de 0,6 mm de diamètre. 4 : Straight Reasarch Array. N/C : non connu

### **I.2.3. Préservation de l'audition et implant cochléaire**

Dans les premières années de l'implantation cochléaire, l'indication de l'implantation était limitée aux surdités profondes. Dans les dernières décennies, l'implantation cochléaire a été aussi indiquée chez des patients avec une audition résiduelle, c'est-à-dire, une persistance d'une audition sur les fréquences graves. Une stimulation électrique des cellules ganglionnaires de la base de la cochlée (fréquences aiguës) associée à une stimulation auditive des régions apicales conservées (fréquences graves) donne des meilleurs résultats dans la perception de la voix en particulier en présence de bruit de fond et une meilleure appréciation musicale (Berrettini et al., 2008 ; Helbig et al. 2011). Cette préservation chirurgicale des basses fréquences lors de l'insertion du porte-électrodes a été rendue possible par l'amélioration à la fois de la conception du porte-électrodes (plus court, plus flexible et plus fin) et de la technique chirurgicale (Gstoettner et al. 2004). Actuellement, la qualité d'insertion du porte-électrodes peut être définie comme l'insertion dans la rampe tympanique avec le moindre traumatisme des structures intracochléaires encore appelée « soft surgery » (Lehnhardt 1993).

La technique choisie pour l'ouverture cochléaire permet de réaliser des implantations atraumatiques. Des études pour comparer les techniques d'ouverture cochléaire n'ont pas trouvé des différences avec l'implantation avec des porte-électrodes courts (20 mm) (Adunka et al. 2014). Une implantation cochléaire réalisée par la fenêtre ronde peut préserver l'audition et de réaliser une chirurgie atraumatique (Gantz et al. 2005 ; Skarzynski et al. 2007 ; Adunka et al. 2014). Les résultats auditifs après la chirurgie atraumatique ont permis de préserver totalement l'audition dans 0-40% de cas avec une cochléostomie et de 13-59% avec un accès par la fenêtre ronde sans trouver des différences entre ces deux techniques (Havenith et al. 2013). La localisation précise de la cochléostomie est un facteur important pour la préservation de l'audition. Une cochléostomie antéro-inférieure (Adunka et al. 2007) ou inférieure (Roland 2005 ; Li et al. 2007) donne de meilleurs résultats qu'une cochléostomie antérieure ou supérieure qui peuvent produire une ouverture de la rampe vestibulaire ou la rupture de la lame spirale osseuse pendant l'introduction du porte-électrodes (Briggs et al. 2005 ; Roland 2005 ; Li et al. 2007 ; Finley et al. 2008 ; Havenith et al. 2013).

Par rapport aux résultats auditifs à long terme (12 mois), une insertion du porte-électrodes par la fenêtre ronde a permis une préservation totale de l'audition dans 13% de cas et une perte totale dans 75% de cas. Avec une insertion par la technique « soft surgery » avec la réalisation d'une cochléostomie antérieure, la préservation totale de l'audition a été atteinte dans 27% des cas, partielle dans 18% et une perte totale dans 55% des cas. Avec une cochléostomie antéro-inférieure, la préservation totale a été obtenue dans 55% des cas, et une perte totale dans 18% des cas (Berrettini et al., 2008). Dans une étude récente, il n'a pas de différence significative dans les résultats postopératoires entre une insertion par une cochléostomie ou par la fenêtre ronde (Adunka et al. 2014).

Pour classer l'atteinte des structures intracochléaires pendant l'insertion du porte-électrodes, une classification du traumatisme intracochléaire (macroscopique) a été décrite (Eshraghi et al., 2006) :

- 0 : Pas de traumatisme.
- 1 : Elévation de la membrane basilaire.
- 2 : Rupture de la membrane basilaire.
- 3 : Translocation dans la rampe vestibulaire.
- 4 : Fracture de la lamine spirale osseuse ou de la paroi modiolaire.

Les stratégies pour diminuer le traumatisme intracochléaire pendant l'introduction du porte-électrodes sont le choix du point d'entrée à la cochlée, la conception du porte-électrodes et la technique d'insertion (Adunka et al. 2007 ; Eshraghi et al., 2006)

## II. Objectifs

Dans la chirurgie de l'implant cochléaire, il existe peu de repères anatomiques sur l'orientation du tour basal de la cochlée. Il a des études analysant l'axe d'insertion du tour basal de la cochlée sur les images des pièces anatomique mais dans l'actualité, l'implantation cochléaire se réalise manuellement et l'insertion du porte-électrodes se réalise selon la représentation mentale du tour basal chez les chirurgiens. Est-ce que la représentation mentale est dépendante de l'expérience chirurgicale ? Est-ce qu'une mauvaise représentation du tour basal aurait des conséquences pendant l'insertion en augmentant les forces d'insertion et le trauma intracochléaire pendant l'implantation cochléaire ? Est-ce que la conception de la porte électrode pourrait rattraper l'erreur chirurgicale par rapport à l'axe d'insertion pendant l'implantation cochléaire ? Compte-tenu de ces questions, nous avons fixé les objectifs suivants :

- Evaluer la représentation mentale du tour basal de la cochlée par la représentation de l'axe d'insertion et le point d'entrée dans le tour basal de la cochlée chez des chirurgiens ayant différents degrés d'expérience ;
- Evaluer les conséquences de l'erreur faite par rapport à l'axe d'insertion idéal du tour basal de la cochlée pendant l'insertion des porte-électrodes.

### III. Matériel et méthodes

#### III.1 Chirugiens

Des chirurgiens du service d'ORL de l'hôpital Pitié-Salpêtrière ont été classés en fonction de leur expérience dans la chirurgie de l'implantation cochléaire :

- expert (n=3) : ayant réalisé plus de 50 implantations cochléaires ;
- non expérimenté (chef de clinique/assistant, CCA, n=7) : ayant réalisé moins de 50 implantations cochléaires ;
- en formation (internes, n=6).

Parmi les 16 chirurgiens évalués, il y avait 8 hommes et 8 femmes, dont 2 gauchères.

#### III.2 Rochers synthétiques

Cinq rochers artificiels, obtenus par la technique de stéréo-lithographie ont été utilisés. Ils sont conçus pour pratiquer la simulation de l'implantation cochléaire et le tour basal de la cochlée est présent dans les cinq spécimens. Il s'agissait de 4 rochers adultes et 1 rocher pédiatrique :

- 3 rochers Phacon (Phacom, Leipzig, Germany) :
  - o Schmidt :
    - 1 rocher droit
    - 1 rocher gauche
  - o Wagner : 1 rocher droit, pédiatrique
- 2 rochers Collin (Temp-Os, Collin, Bagneux, France)
  - o 1 rocher droit
  - o 1 rocher gauche.

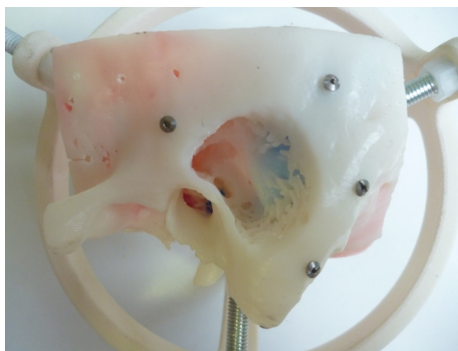


Figure 6. Rocher synthétique (Collin, Bagneux, France) avec la voie d'abord réalisée et les 4 marqueurs fiduciaux utilisés pour le recalage avec les images sur le Digipointeur.

La voie d'abord classique (mastoïdectomie et tympanotomie postérieure) a été réalisée pour exposer largement la région de la fenêtre ronde. Le récessus facial a été ouvert complètement jusqu'à l'exposition du nerf facial et la corde du tympan. Quatre marqueurs fiduciaux (vis à tête plate 2x5 mm, VN2105, Collin, Bagneux, France) ont ensuite été mis en place dans la région près de la mastoïdectomie (Bozorg et al. 2009) (Fig.6).

Un scanner cône-beam (Newtom 5G Cone Beam, Verona, Italy) a été réalisé pour chacun de ces rochers, avec un protocole compatible avec l'utilisation du Digipointeur® : champs de vue : 60 mm, largeur des coupes 0,6 mm, intervalle de coupes : 0,3 mm, haute résolution: os +, format DICOM, orientation : axial sans reconstruction.

L'axe théorique est défini par la ligne entre le point le plus éloigné de la paroi latérale de la cochlée et le point d'entrée à la cochlée passant par le centre de la rampe tympanique. Pour la détermination de l'axe théorique, une analyse des images du cône-beam a été réalisée avec l'aide du Digipointeur®. Au premier, un point dans la paroi latérale de la cochlée a été déterminé comme cible par rapport à la région de la fenêtre ronde dans les trois plans. Un système de coordonnées du point cible a permis d'enregistrer la position du point par rapport aux trois plans et de faire reproductible sa position dans l'évaluation des chirurgiens. Pour l'affichage de l'axe d'insertion, un instrument porte par le chirurgien a été recalé avec les images a été réalisé avec l'aide des 4 marqueurs fiduciaux placés pour le traitement précis des images. Un émetteur ancillaire a été attaché au rocher pour recaler l'instrument prédéfini de 2 mm de diamètre avec une angulation stable. Le placement de la pointe de l'instrument sur la région de la fenêtre ronde permet d'afficher l'axe d'insertion entre la pointe de l'instrument porte par le chirurgien et le point cible sur la paroi latérale de la cochlée.

En pratique clinique, l'axe d'insertion passe par le centre de la rampe tympanique. Dans l'ensemble des rochers utilisés n'est pas représenté la rampe tympanique mais le tour basal de la cochlée (labyrinthe osseux). Dans l'analyse préliminaire des images pour définir le point dans la paroi latérale, nous avons défini ce point arbitrairement correspondant à la position de la rampe tympanique.

### III.3. Evaluation du point d'entrée à la cochlée par les chirurgiens

L'évaluation du point d'entrée de la cochlée a été faite indirectement dans chaque rocher à partir des photographies prises de la région de la fenêtre ronde à différents grossissements sur les photos. Après la visualisation par microscopie de la tympanotomie postérieure et de la région de la fenêtre ronde, nous avons réalisées de photographies focalisées sur la région de la fenêtre ronde avec différents grossissements pour prendre en considération les structures voisines à la région de la fenêtre ronde pour permettre l'orientation du chirurgien sur le rocher à évaluer. A plus fort grossissement, il a été demandé aux chirurgiens de placer une cible dans la région de la fenêtre ronde pour accéder à l'axe du tour basal de la cochlée des cinq rochers synthétiques. La région de la fenêtre ronde a été divisée par régions (supérieur, antérieur, antéro-inférieur, inférieur par rapport à la fenêtre ronde). Aucune information n'a été donnée sur le rocher (droit ou gauche), seulement la visualisation des photographies du rocher et de la région de la fenêtre ronde a été fournie pour la représentation du point d'entrée. La position de la cible a été enregistrée et la localisation du point d'entrée définie par rapport à la fenêtre ronde.

### III.4 Evaluation de la représentation mentale de l'axe d'insertion par les chirurgiens

L'affichage de la pointe et la direction dans l'espace de l'instrument ont été calibrés avec l'aide des 4 marqueurs fiduciaires. Après la vérification du recalage de l'instrument et les images affichées sur le Digipointeur®, il a été demandé aux chirurgiens de placer l'instrument sur l'axe d'insertion du rocher. Ensuite, le chirurgien visualise le rocher et la région de la fenêtre ronde avec l'aide du microscope opératoire (Leica M690 Wild Heerbrugg Mel48 Microscope, Wetzlar, Germany) ayant distance focale entre 350 et 400 mm. Le chirurgien a mis la pointe de l'instrument sur la région de la fenêtre ronde et dirige l'instrument dans la direction de l'axe d'insertion selon sa représentation mentale. Une fois placé l'instrument dans la position désirée, un enregistrement de l'écran a été effectué au signal du chirurgien. Le temps pour réaliser l'expérience a été mis en compte. A aucun moment, le chirurgien n'avait accès aux images affichées sur le Digipointeur®, il ne visualise que la voie d'abord (tympanotomie postérieure et la région de la fenêtre ronde) (Fig. 7)

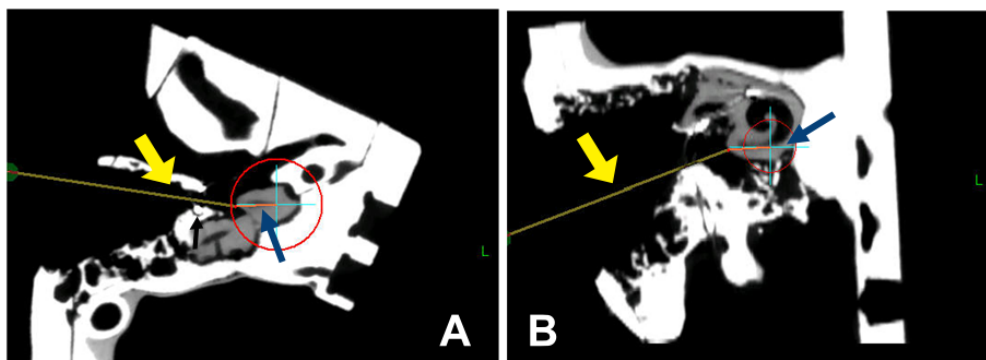


Figure 7 . Axe d'insertion du tour basal de la cochlée (flèche bleue) et représentation de la position de l'instrument porté par le chirurgien (flèche jaune) dans les plans axial (A) et coronal (B). Cet axe d'insertion passe par la tympanotomie postérieure et limité dans la partie postérieure par la troisième portion du nerf facial (flèche noire) dans le plan axial.

Une fois enregistré les images, la mesure de l'angle entre l'axe idéal et la direction de l'instrument a été déterminé avec le logiciel ImageJ (ImageJ 1.47v, Wayne Rashband, National Institutes of Health, USA) dans les plans axial et coronal.

Un point important pour l'évaluation de l'axe d'insertion est la position du nerf facial. Dans le plan axial, l'axe idéal peut passer par la tympanotomie postérieure sans traverser le nerf facial (axe idéal anatomique). Quand l'axe d'insertion traverse le nerf facial, il a été considéré l'axe idéal chirurgical comme axe idéal (axe passant par le bord postérieur de la tympanotomie postérieure). Dans le plan coronal, la position du nerf facial n'interfère pas avec la trajectoire de l'axe d'insertion.

A fin de valider les mesures, l'erreur dû à l'utilisation du logiciel ImageJ a été évalué. Ils ont été réalisés 40 mesures d'un même angle de 6 degrés affichée par le Digipointeur®. Le degré d'incertitude dû à la mesure répété a été de ( $6 \pm 0,08^\circ$ ) (moyenne  $\pm$  ESM).

### III.5 Evaluation de la reproductibilité de l'axe d'insertion

Pour mesurer la reproductibilité de l'axe d'insertion, ils ont été réalisés 40 mesures successives sur un bloc en bois et sur un rocher par le même chirurgien.

Dans le bloc en bois, il a été réalisé un orifice de 2 mm de diamètre par 3 cm de long en cul-de-sac. Pour le effectuer le recalage, ils ont été faites des marques fiduciaires dans différents position sur le bloc en bois pour reconnaître son orientation dans les images. Ensuite, il a été réalisé un scanner avec un protocole Digipointeur du bloc en bois. Un instrument a été recalé avec les images du Digipointeur® avec l'aide des marques fiduciaires et un émetteur ancillaire attaché au bloc en bois. Puis, le chirurgien prend l'instrument et l'introduit sur l'orifice dans 40 occasions jusqu'au fond, un enregistrement de l'écran du Digipointeur a été effectué (Fig. 8). Suite à chaque mesure, le chirurgien laisse l'instrument sur la table. L'angle entre l'axe de l'instrument et le centre de l'orifice a été mesuré dans les plans axial et coronal avec le logiciel ImageJ.

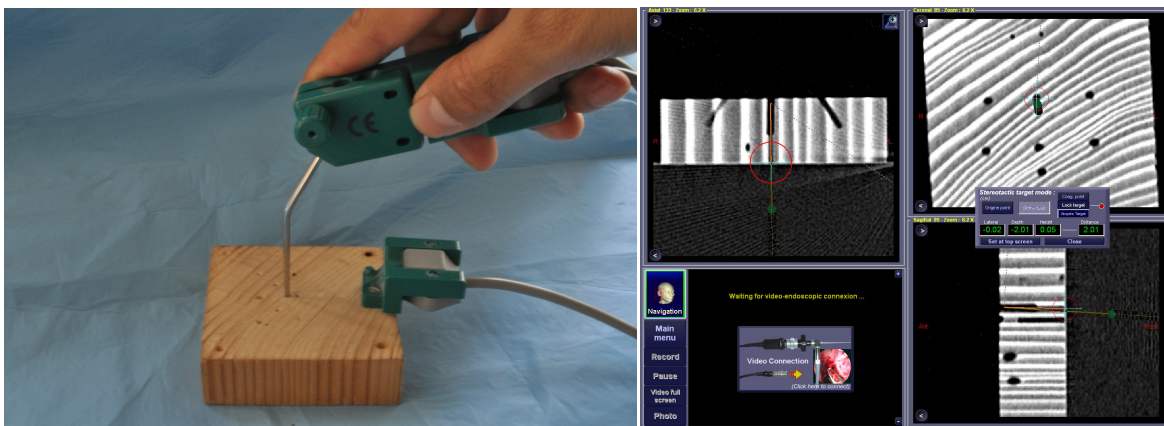


Figure 8. Mesure de l'erreur angulaire dû au Digipointeur réalisé dans un bloc en bois. (à gauche). Orientation de l'instrument porté par le chirurgien affiché dans l'écran du Digipointeur (à droite)

De même, l'axe d'insertion a été représenté de façon successive dans un rocher, au total 40 mesures. Le recalage de l'instrument a été réalisé de la même façon que pour l'évaluation de l'axe d'insertion des chirurgiens. Le même chirurgien visualise le rocher et la région de la fenêtre ronde et positionne l'instrument dans l'axe d'insertion selon sa représentation mentale de façon successive, entre chaque mesure, le chirurgien laisse l'instrument sur la table et reitre la vue des oculaires du microscope. L'angle entre l'axe d'insertion et la direction de l'instrument a été mesure avec le logiciel ImageJ dans les plans axial et coronal.

### III.6 Rochers humains et insertion du porte-électrodes

Dix rochers humains différents de cinq patients (cotés gauche et droit) ont été utilisés pour réaliser des insertions des porte-électrodes dans différents angles (axe idéal du rocher et l'approximation des chirurgiens experts, CCA et internes). Les rochers ont été acquis de l'institut de Fer à Moulin et congelées pour la conservation.

La préparation des rochers a été similaires aux rochers synthétiques avec la réalisation de la voie d'abord, mise en place de quatre vis comme marqueurs fiduciaires de 3x5 mm (DIN914, Micromodele, Strasbourg, France).

Une imagerie cône-beam a été réalisée suivant le même protocole (champs de vue : 60 mm, largeur des coupes 0,6 mm, intervalle de coupes : 0,3 mm, haute résolution: os +, format DICOM, orientation : axial sans reconstruction).

Suite à la réalisation du cône-beam, nous avons réalisé des mesures pour déterminer les dimensions de la cochlée des 10 rochers. Le logiciel Osirix (Osirix Imaging Software Free Version, DICOM Viewer) est utilisé pour le traitement des images obtenues par cône-beam. Les dimensions de la cochlée ont été déterminés dans les 10 pièces anatomiques (Martinez-Monedero et al., 2011) (Fig. 9):

- Distance 1 : entre le point moyen de la fenêtre ronde et la paroi latérale en passant par le modiole,
- Distance 2 : perpendiculaire à la distance 1 passant par le modiole,
- Distance 3 : la hauteur de la cochlée (base – apex),
- Angle entre le premier et le deuxième tour a été mesuré entre les axes parallèles au deux tours.

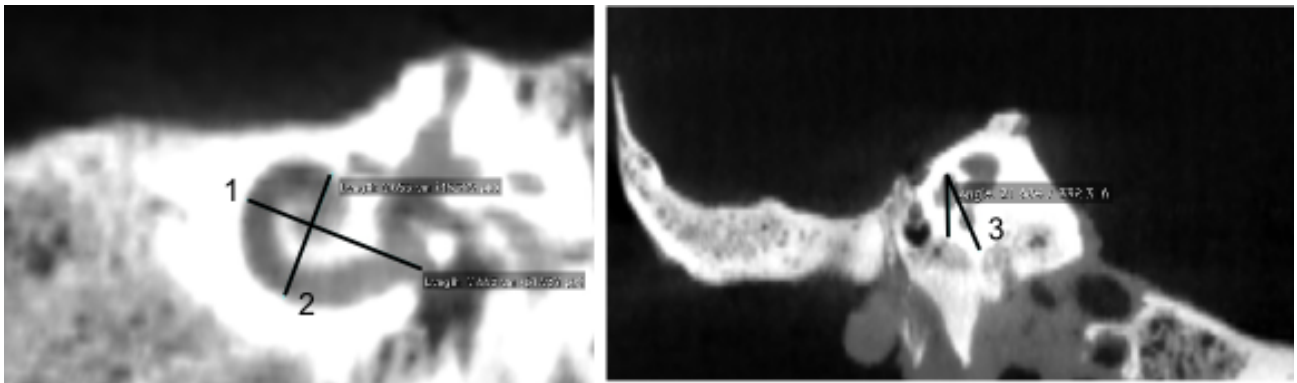


Figure 9. Dimensions de la cochlée. 1 : Distance 1, 2 : Distance 2, 3 : angle entre le premier et le deuxième tour de la cochlée.

Une mesure des dimensions des cochlées des rochers humains est fournie dans le tableau 2 :

Tableau 2. Mesures des dimensions de la cochlée dans les 10 rochers humains

	Rocher Droit (n=5)	Rocher Gauche (n=5)
	m ± SEM	m ± SEM
<b>Longueur (mm)</b>	8,6 ± 0,11	8,9 ± 0,1
<b>Largeur (mm)</b>	6,8 ± 0,14	6,7 ± 0,1
<b>Hauteur (mm)</b>	3,7 ± 0,14	3,6 ± 0,1
<b>Angle 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> tour (degrés)</b>	17 ± 1,1	18 ± 1,0

Une modèle de cochlée microdisséquée est réalisée consistant en l'exposition de la membrane basilaire des deux premiers tours de la cochlée par l'ouverture de la rampe vestibulaire. Un fraisage de l'oreille externe et moyenne est effectué pour exposer le promontoire et les fenêtres ovale et ronde. Ensuite, le fraisage du promontoire est réalisé pour exposer la membrane basilaire en respectant l'intégrité de la rampe tympanique (Nguyen et al., 2011). Le nerf facial est resté en place comme la limite postérieure de l'axe d'insertion. L'ouverture de la cochlée a été réalisée avec une exposition de la fenêtre ronde avec fraisage des sourcils antéro-inférieur et postéro-supérieur et la crista fenestra pour réaliser les insertions.

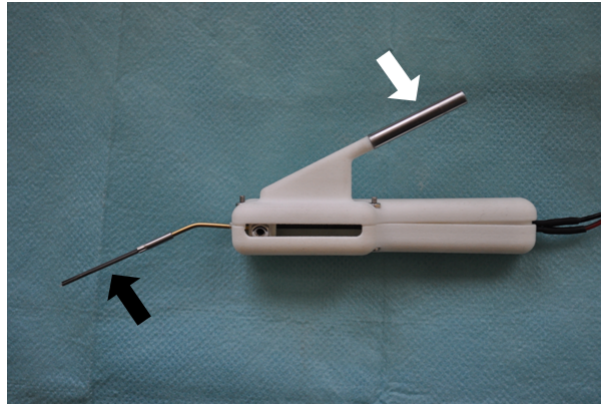
### III.7 Insertion du porte-électrodes

Des insertions du porte-électrodes ont été réalisés dans différents angles (axe idéal et dans l'erreur des experts, CCA et des internes). Un outil d'insertion motorisé a été utilisé pour atteindre cet objectif. Il a été validé dans notre laboratoire pour réaliser des insertions dans une vitesse constant dépendant du voltage délivré. Une fois recalé l'outil d'insertion avec les images du rocher, l'axe d'outil a été aligné avec l'axe idéal du rocher, celle-ci a été manipulé par le Robotol. Le Robotol est un prototype développé dans notre laboratoire conçu pour la chirurgie otologique, il permet des mouvements linéaires et angulaires sur un point défini par la pointe de l'outil (Nguyen et al., 2011). Le porte-électrode a été chargé dans la partie terminale attaché à l'outil (AB-6135, Advanced Bionics). La pointe de l'outil a été placée dans la porte d'entrée à la cochlée correspondant à la fenêtre ronde et l'axe de l'outil a été aligné visuellement avec l'axe d'insertion du rocher. Pour positionner l'axe de l'outil dans différents angulation, un déplacement angulaire sur le point d'entrée automatisé est effectué avec l'aide du Robotol. L'outil d'insertion, une fois placé dans la position désiré, des insertions dans une vitesse constante de 1 mm/s est généré avec une courante de 7,5 V.

### III.8 Mesure des forces d'insertion et estimation de la translocation

Les rochers ont été fixés et couplés à un capteur de forces de 6 axes (ATI Nano 17, calibration type SI-12-0,12, résolution 3 mV, Apex, NC, USA) capable de mesurer les forces dans les 3 directions orthogonales dans l'espace (Dx, Dy, Dz) et les 3 couples (Rx, Ry, Rz) avec une résolution de 1/320N (Miroir et al. 2012). Après avoir placé l'outil d'insertion dans l'axe désiré, l'enregistrement des données du capteur de forces sont enregistrées par une interface digitale NI PCI6518<sup>®</sup> (National Instruments, Nanterre, France). Le couplage vidéo / forces d'insertion est réalisé pour évaluer le changement des forces d'insertion par rapport au moment de translocation du porte-électrodes.





**Figure 10. Outil d'insertion motorisé (prototype). Il permet de réaliser des insertions de la porte électrode dans une vitesse constante. La porte électrode est chargée dans la partie terminale de l'outil (flèche noire). Partie permettant le couplage avec le Robotol (flèche blanche).**

Une insertion avec une vitesse constante (1mm/s) est générée par un courant continu de 7,5V fourni à l'outil d'insertion motorisé (Fig. 10), tant que la vitesse d'insertion ne change pas les forces d'insertion (Miroir et al., 2012 ; Nguyen et al., 2012).

Pendant les insertions, un enregistrement vidéo en temps réel est réalisé pour mettre en évidence la translocation du porte-électrodes à travers la membrane basilaire avec le microscope opératoire (Zeiss Universal OPMI1, Jena, Allemagne) et une camera de vidéo (NikonD5000, Tokyo, Japon). Le microscope est placé perpendiculaire au modiole à une distance de 300 mm de la cochlée pour permettre une vue du tour basal de la cochlée. Une synchronisation est réalisée entre l'enregistrement de forces et l'enregistrement vidéo.

### **III.9 Statistiques**

Pour l'analyse statistique, le logiciel SPSS (22.0 Chicago Illinois, USA) est utilisé. Les valeurs indiquées sont des moyenne  $\pm$  ESM. Pour l'analyse statistique, des tests non paramétriques sont utilisés. Pour l'évaluation des facteurs intervenants dans l'augmentation des forces nous avons utilisé un test multivarié entre les facteurs avec une signifiante  $p < 0,1$ . Un  $p < 0,05$  est considéré comme significatif.

## IV. Résultats

### IV.1 Evaluation de la reproductibilité de l'axe d'insertion

Dans une première série d'expériences, la variation de l'angle entre l'axe de l'instrument et l'axe idéal sur un rocher a été plus grande que celle trouvée entre l'axe de l'orifice creusé sur le bois et l'axe de l'instrument avec un erreur de ( $10^\circ \pm 0,5^\circ$  et  $7^\circ \pm 0,3^\circ$ ) pour le rocher et ( $3^\circ \pm 0,1^\circ$  et  $1^\circ \pm 0,1^\circ$ ) pour le bloc en bois dans les plans axial et coronal respectivement (moyenne  $\pm$  ESM). (Fig. 11).

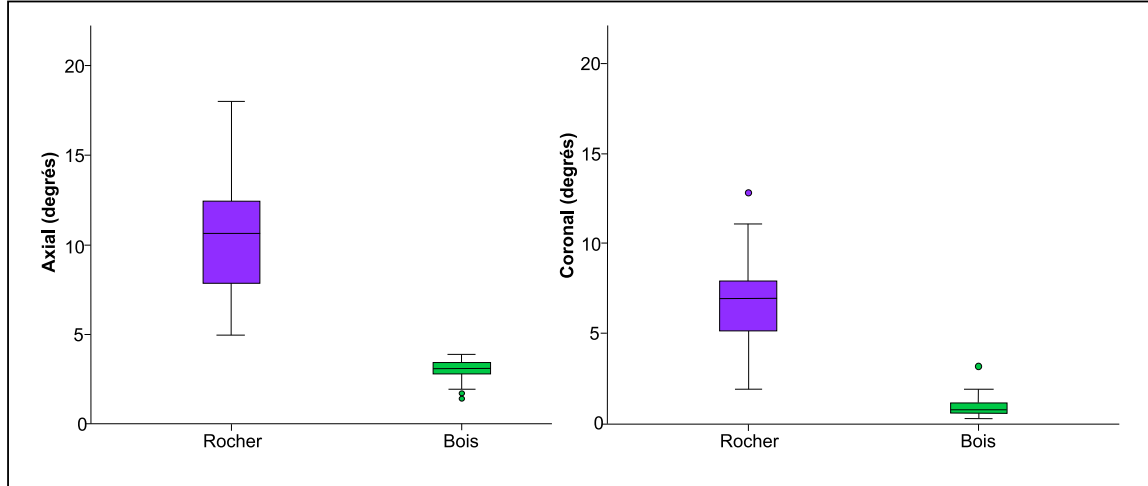


Figure 11 Comparaison entre la mesure répétée 40 fois par le même chirurgien de l'axe d'insertion sur un rocher synthétique et sur un même orifice de 2 mm en cul-de sac creusé dans un bloc de bois. Notez la variation de l'angulation de l'axe d'insertion dans le rocher qui implique une représentation mentale de l'axe du tour basal de la cochlée par rapport au résultat sur un angle visible.

### IV.2 Evaluation de la représentation mentale de l'implantation cochléaire

#### IV.2.1 Point d'entrée au tour basal de la cochlée

Notre étude montre une grande variabilité du choix du point d'entrée au tour basal de la cochlée chez les chirurgiens (Fig. 12). La fenêtre ronde a été la localisation la plus fréquemment choisie par les chirurgiens ( $n=42$ , 53%). Par rapport aux groupes des chirurgiens, les chirurgiens experts ont été plus flexibles dans le choix du point d'entrée, mais la fenêtre ronde est restée comme le point le plus fréquemment choisi (6 sur 15, 40%), contre 14 sur 35 (40%) chez les CCA et 22 sur 30 (73%) chez les internes. Les experts n'ont jamais choisi un point d'entrée supérieur à la fenêtre ronde (Fig. 12).

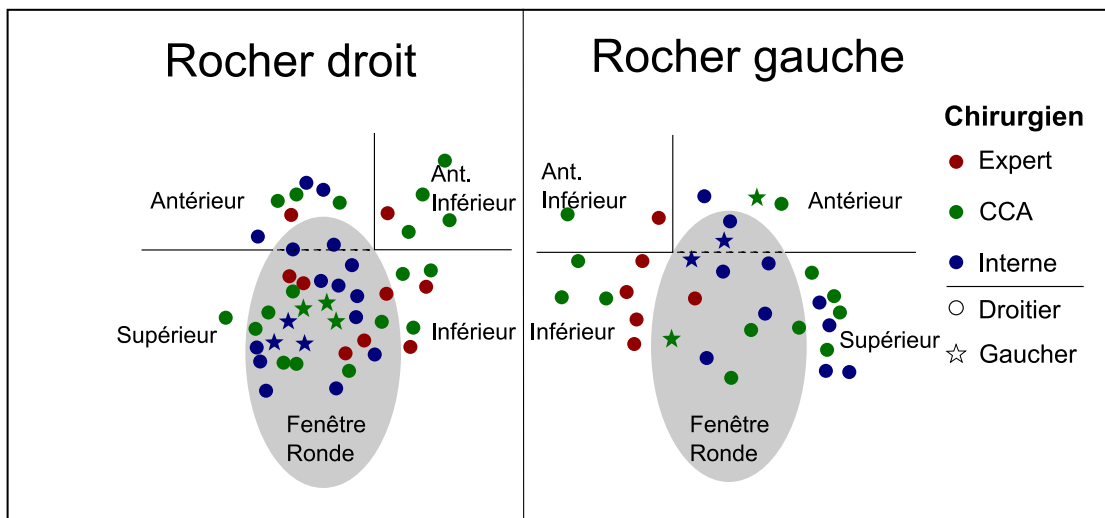


Figure 12. Représentation du point d'entrée dans la rampe tympanique par rapport à la fenêtre ronde dans les rochers droits ( $n=48$ ) et gauches ( $n=36$ ). Notez la grande dispersion des points d'entrée. La fenêtre ronde a été le choix le plus fréquent parmi les chirurgiens dans les rochers droits ( $n=30/80$  ; 62,5%) et gauches ( $n=12$  ; 33,3%). Le point d'entrée supérieur ( $n=9$ ) a été choisi que

Par rapport aux rochers droits et gauches, notre étude montre que dans le rocher droit, la fenêtre ronde (n=30, 62,5%) a été choisie plus fréquemment que dans les rochers gauches (n=12 ; 33,3%). Le point d'entrée supérieur a été désigné comme point d'entrée plus souvent dans les rochers gauches (n=8 ; 22,2%) que dans les rochers droits (n=1 ; 2,1%) (Table 3). Les chirurgiens gauchers ont choisi la fenêtre ronde comme point d'entrée dans 90% de cas (n=9/10).

**Tableau 3. Localisation du point d'entrée dans la rampe tympanique représenté par les chirurgiens dans la région de la fenêtre ronde dans tous les rochers.**

	Droit (n=48)		Gauche (n=36)	
	n	%	n	%
<i>Fenêtre ronde</i>	30	62,5	12	33,3
<i>Antérieur</i>	7	14,6	3	8,3
<i>Ant. Inf.</i>	5	10,4	2	5,6
<i>Inferieur</i>	5	10,4	7	19,4
<i>Supérieur</i>	1	2,1	8	22,2

*Ant. Inf.* = Antéro-inférieur.

#### IV.2.2 Erreur dans la représentation de l'axe d'insertion

En ce qui concerne la représentation de l'axe d'insertion chez les chirurgiens les données individuelles sont reportées dans les tableaux 4 et 5.

**Tableau 4. Tableau descriptif de l'approximation de l'axe d'insertion dans les 5 rochers dans le plan axial chez les chirurgiens en fonction du sexe et le degré d'expérience en incluant les deux chirurgiens gauchères (E). \*, \*\* : Rochers provenant du même sujet**

	Rocher 1	Rocher 2	Rocher 3	Rocher 4	Rocher 5	Plan Axial			
	Droit	Droit*	Droit**	Gauche*	Gauche**	m ± ESM	Médiane	Min.	Max.
<b>Hommes</b>									
1 Expert	8	4	4	3	20	8 ± 3,3	4	3	20
2 Expert	2	1	3	13	3	5 ± 2,2	3	1	13
3 Expert	6	6	14	3	14	9 ± 2,3	6	3	14
4 CCA	15	7	17	23	12	15 ± 2,6	15	7	23
5 CCA	16	4	3	16	11	10 ± 2,8	11	3	16
6 CCA	13	4	12	12	6	9 ± 1,8	12	4	13
7 Interne	27	13	2	22	26	18 ± 4,7	22	2	27
8 Interne	6	13	2	6	18	9 ± 2,9	6	2	18
<b>Femmes</b>									
9 CCA	40	20	5	15	1	16 ± 6,8	15	1	40
10 CCA	20	4	14	9	24	14 ± 3,7	14	4	24
11 CCA <sup>E</sup>	10	2	1	15	3	6 ± 2,7	3	1	15
12 CCA	13	27	8	33	38	24 ± 5,8	27	8	38
13 Interne	22	9	9	7	20	14 ± 3,1	9	7	22
14 Interne	13	11	14	19	29	17 ± 3,1	14	11	29
15 Interne	16	20	3	31	17	17 ± 4,5	17	3	31
16 Interne <sup>E</sup>	20	20	13	28	4	17 ± 4,1	20	4	28

Tableau 5. Tableau descriptif de l'approximation de l'axe d'insertion dans les 5 rochers dans le plan coronal chez les chirurgiens en fonction du sexe et le degré d'expérience en incluant les deux chirurgiens gauchères (£). \*, \*\* Rochers provenant des mêmes sujets

	Rocher 1	Rocher 2	Rocher 3	Rocher 4	Rocher 5	Plan Coronal			
	Droit	Droit*	Droit**	Gauche*	Gauche**	m ± ESM	Médiane	Min.	Max.
<b>Hommes</b>									
1 Expert	-15	-5	-9	-15	-18	-12 ± 2,3	-15	-18	-5
2 Expert	-4	-4	-4	-8	-2	-4 ± 1	-4	-8	-2
3 Expert	-2	-1	-4	-1	-1	-1 ± 0,6	-1	-4	-1
4 CCA	-23	-25	-10	-18	-7	-17 ± 3,6	-18	-25	-7
5 CCA	-10	-13	-8	-4	-3	-8 ± 1,9	-8	-13	-3
6 CCA	-5	-2	-7	5	-2	-2 ± 2,1	-2	-7	5
7 Interne	-9	-26	-16	-26	-40	-23 ± 5,3	-26	-40	-9
8 Interne	-6	-17	-4	-6	-17	-10 ± 2,9	-6	-17	-4
<b>Femmes</b>									
9 CCA	-20	-14	-18	-37	-21	-22 ± 3,9	-20	-37	-14
10 CCA	-14	-9	-12	-26	-4	-13 ± 3,6	-12	-26	-4
11 CCA <sup>£</sup>	-17	-16	-5	-39	-29	-21 ± 5,9	-17	-39	-5
12 CCA	-2	-3	-6	-21	-4	-7 ± 3,5	-4	-21	-2
13 Interne	-20	-16	-26	-28	-29	-24 ± 2,5	-26	-29	-16
14 Interne	-10	-15	-24	-27	-26	-20 ± 3,4	-24	-27	-10
15 Interne	-7	-15	-17	-19	-12	-14 ± 2,1	-15	-19	-7
16 Interne <sup>£</sup>	-15	-13	-16	-16	-28	-17 ± 2,5	-16	-27	-13

Les experts font mieux que les CCA à la fois dans le plan axial ( $7 \pm 1,5^\circ$  vs  $14 \pm 1,7^\circ$ ;  $p=0,017$ , test de Kruskal Wallis) et dans le plan coronal ( $-6 \pm 1,5^\circ$  vs  $-13 \pm 1,7^\circ$ ;  $p=0,009$ , test de Kruskal Wallis). Les CCA ont été plus performantes que les internes pour représenter l'axe d'insertion dans le plan coronal ( $-13 \pm 1,7^\circ$  vs  $-17 \pm 1,9^\circ$ ;  $p=0,016$ , test de Kruskal Wallis), mais pas dans le plan axial ( $14^\circ \pm 1,7^\circ$  vs  $15^\circ \pm 1,5^\circ$ ). Les chirurgiens hommes et femmes ayant la même expertise font des erreurs similaires (Fig. 13).

Nous n'avons pas mis en évidence de différence nette selon le côté droit ou gauche de rocher d'une part, ni entre chirurgien gaucher et droitier avec une même expertise d'autre part.

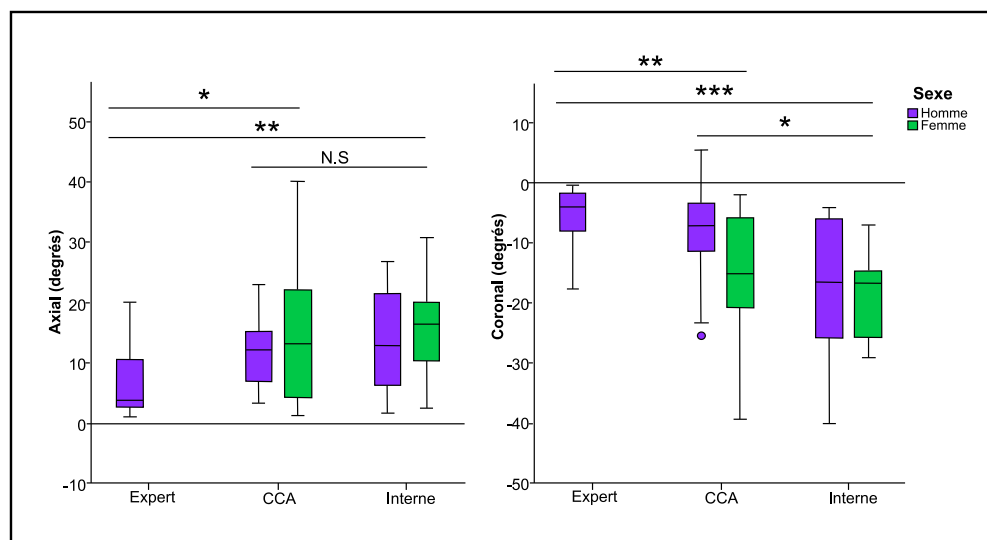


Figure 13. Erreur de l'axe d'insertion par rapport à l'axe idéal chez les chirurgiens en fonction du sexe et du degré d'expérience

### IV.3 Temps effectif pour représenter l'axe d'insertion

Les experts ont été plus rapides dans la représentation de l'axe d'insertion ( $59 \pm 6$  s ;  $p < 0,001$ , test de Kruskal Wallis) que les internes ( $86 \pm 10$  s vs  $104 \pm 12$  s). Aucune autre différence n'a été retrouvée (Fig. 14).

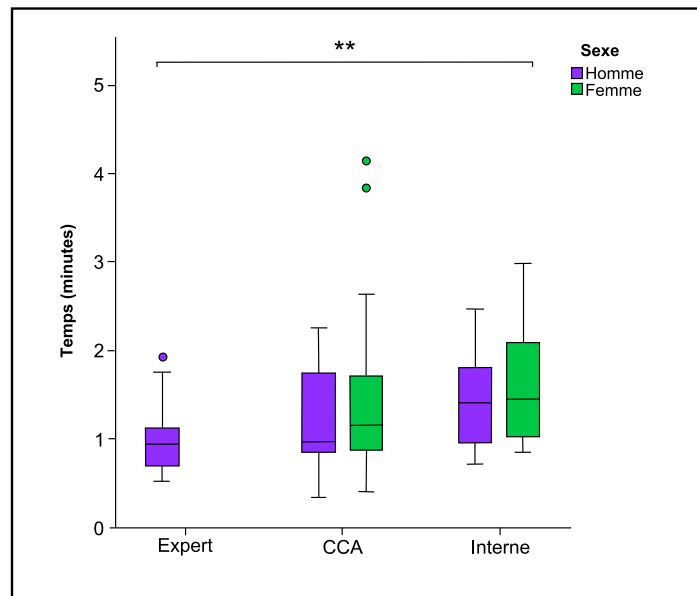


Figure 14. Temps effectif pour représenter l'axe d'insertion en fonction du degré d'expérience chirurgicale et le sexe. Notez que les experts ont été plus performantes que les internes ( $p < 0,001$ , test de Kruskal Wallis).

### IV.4 Comparaison de l'axe d'insertion et le point d'entrée au tour basal de la cochlée

La représentation de l'axe d'insertion a été évaluée en fonction du point d'entrée à la cochlée dans les plans axial et coronal (Tableau 7). Dans le groupe des experts, l'erreur a été moindre quand ils ont choisi la fenêtre ronde et un point d'entrée antérieure au tour basal de la cochlée. Dans le plan coronal, notre travail ne montre pas de corrélation entre l'axe d'insertion et le point d'entrée au tour basal.

Chez les CCA, le point d'entrée antérieure a été lié à une meilleure approximation de l'axe d'insertion dans le plan axial ( $6 \pm 2,2^\circ$ ). Dans le plan coronal, le choix des points d'entrée antéro-inférieur ( $-7 \pm 2,0^\circ$ ) et inférieur ( $-7 \pm 3,9^\circ$ ) ont été liés à une meilleure approximation de l'axe d'insertion.

Chez les internes, le choix du point d'entrée supérieur a été en rapport à une moindre approximation sur l'axe d'insertion dans les plans axial ( $21 \pm 1,8^\circ$ ) et coronal ( $-27 \pm 5,7^\circ$ ) (Tableau 6).

Tableau 6. Axe d'insertion du tour basal de la cochlée par rapport au choix du point d'entrée chez les chirurgiens.

	n	Axial (degrés)		Coronal (degrés)		
		m ± ESM	Médiane	m ± ESM	Médiane	
<b>Expert</b>	<i>Fenêtre Ronde</i>	6	4 ± 0,7	4	-5 ± 2,1	-4
	<i>Inférieur</i>	5	12 ± 2,9	13	-8 ± 3,5	-8
	<i>Ant. Inférieur</i>	2	2 ± 0,8	2	-3 ± 1,2	-3
	<i>Antérieur</i>	1	14	14	-3,73	-4
	<i>Supérieur</i>	0				
<b>CCA</b>	<i>Fenêtre Ronde</i>	14	15 ± 3,2	13	-16 ± 3,1	-14
	<i>Inférieur</i>	6	13 ± 1,5	14	-7 ± 3,9	-5
	<i>Ant. Inférieur</i>	5	13 ± 4,4	12	-7 ± 2,0	-7
	<i>Antérieur</i>	5	6 ± 2,2	5	-17 ± 3,9	-18
	<i>Supérieur</i>	5	20 ± 4,7	23	-14 ± 4,5	-18
<b>Interne</b>	<i>Fenêtre Ronde</i>	22	15 ± 1,7	13	-15 ± 2,1	-15
	<i>Inférieur</i>	0				
	<i>Ant. Inférieur</i>	0				
	<i>Antérieur</i>	4	12 ± 6,3	9	-21 ± 2,5	-21
	<i>Supérieur</i>	4	21 ± 1,8	21	-27 ± 5,7	-28

#### IV.5 Comparaison de l'axe d'insertion et le point d'entrée au tour basal de la cochlée

Des insertions sur des rochers humains n'ont pas été effectuées. Le système outil d'insertion/Digipointeur/RobOtol n'a pas une précision suffisante pour permettre l'alignement de l'outil d'insertion dans un axe d'insertion désiré. Une adaptation de l'outil d'insertion pour atteindre cet objectif n'a pas été possible pendant la période de stage.

## V. Discussion

Consistent à l'idée que l'implantation cochléaire fait intervenir la représentation mentale, les informations visuelles du champ opératoire et du tour basal de la cochlée permettent une insertion correcte du porte-électrode. La représentation de l'axe d'insertion est dépendante de l'expérience chirurgicale, avec des meilleurs résultats dans le groupe des experts par rapport aux chirurgiens non expérimentés. Cependant, la représentation mentale garde une grande variabilité individuelle et interindividuelle.

### V.1 Validation de l'axe théorique

Admettant que l'axe de la rampe tympanique dans le tour basal de la cochlée est la façon idéale d'introduire le porte-électrodes, nous avons utilisé des rochers synthétiques pour définir l'axe d'insertion, ces rochers synthétiques sont validés pour réaliser la simulation chirurgicale et l'implantation cochléaire (Roosli et al. 2013). En effet, la structure du tour basal de la cochlée est présente dans les rochers. D'où, nous avons réalisé un cône-beam pour définir l'axe d'insertion et confirmé la présence des deux premiers tours dans les rochers.

L'axe d'insertion passe par le centre de la rampe tympanique. Par contre, les rochers utilisés n'ont ni la membrane basilaire ni la rampe tympanique mais l'ensemble du tour basal de la cochlée (labyrinthe osseux). Ainsi, dans l'analyse préliminaire des images, nous avons caractérisé ce point arbitrairement correspondant à la position de la rampe tympanique par rapport à la région de la fenêtre ronde dans les trois plans (Whiting et al. 2008). Les coordonnées de ce point ont été utilisées pour l'évaluation de l'axe d'insertion.

Le choix de ce point a été important pour faire reproductible sa position dans toutes les évaluations, en conséquence, le placement de la pointe de l'instrument sur la région de la fenêtre ronde permettait de dessiner le même axe d'insertion idéal pour chaque rocher évalué.

### V.2 Validation de la conception de l'axe d'insertion

Le recalage de l'instrument porté par le chirurgien avec les images permet d'évaluer l'erreur de l'axe de l'instrument et l'axe idéal. L'utilisation des marqueurs fiduciaires permettent de recalibrer l'instrument et de réaliser la corroboration du recalage de la pointe de l'instrument. La position de la pointe de l'instrument conduit à la visualisation de l'axe d'insertion, donc le recalage a été corroboré avant l'évaluation des chirurgiens. Par contre, cela ne permettait pas d'évaluer le recalage de la position de l'instrument pour l'évaluation de l'approximation de l'axe idéal.

Etant donné que la position de l'instrument est importante pour évaluer l'axe d'insertion. Nous avons utilisé un bloc de bois pour estimer la précision du Digipointeur® par rapport à la position de l'instrument. Ainsi, la réalisation d'un scanner au bloc en bois a été effectué, cette technique est utilisée pour étudier des arbres en biologie (Schütt et al. 2004). L'introduction de l'instrument dans l'orifice, d'une part, c'est une tâche manuelle et n'intervient pas la représentation mentale du chirurgien, étant donné que l'orifice est étanche avec l'instrument, l'erreur affichée entre l'axe de l'instrument et l'axe de l'orifice correspond à l'erreur du Digipointeur sur la position de l'instrument dans l'espace. Cette erreur a été similaire dans les plans axial et coronal et moindre d'un degré ( $0,59^\circ$  et  $0,55^\circ$  respectivement).

L'erreur du Digipointeur® sur la position de l'instrument a été faible, la mesure des angles a été réalisée avec le logiciel ImageJ. De manière à évaluer l'erreur du logiciel, nous avons évalué un angle donné par l'évaluation d'un chirurgien par hasard prise dans la photographie de l'écran du Digipointeur. La pixellisation et la qualité des images peuvent altérer les mesures de l'angle. Des mesures répétées d'un même angle ont permis d'évaluer l'erreur due à la mesure suite à l'utilisation du logiciel ImageJ qui a été moindres d'un degré ( $\pm 0,53$ ). L'erreur totale du système utilisé a été autour de 1 degré ( $\pm 1,08^\circ$ ).

Pour la mesure de l'angle d'insertion, le nerf facial est une structure qui délimite la partie postérieure de la tympanotomie postérieure, vu que l'axe d'insertion peut passer sur le nerf facial (Meshik et al. 2010), aussi l'évaluation de l'axe d'insertion a été dépendant de la position du nerf facial dans tous les cas.

### V.3 Validation des groupes des chirurgiens

Dans notre étude, nous avons évalué des chirurgiens de différents degrés d'expérience dans le Service d'ORL de l'Hôpital Pitié-Salpêtrière, du fait d'être le seul service parisien référent pour l'implantation cochléaire chez l'adulte. La classification en chirurgiens seniors (experts), chirurgiens non expérimentés (CCA) et des chirurgiens en formation (internes) à l'avantage d'être facile à établir. Cependant, le degré d'expérience selon les stages et les formations ainsi que leur durée (nombre de stages par exemple) qu'il existe au sein de chacune des groupes selon le degré d'expérience est difficile à contrôler.

La chirurgie otologique est une chirurgie qui demande un long entraînement. A notre connaissance, il n'existe pas des études concernant la courbe d'apprentissage dans la chirurgie de l'implant cochléaire. Par contre, une étude réalisée pour évaluer la courbe d'apprentissage dans la chirurgie de résection du schwannoma vestibulaire montre que à partir 56 chirurgies réalisées, il existe une évidence d'expertise pour accomplir des meilleurs résultats (Wang et al. 2013). Cette chirurgie demande une connaissance de l'anatomie du rocher pour diminuer les complications et des techniques de base de la chirurgie otologique.

Dans autre étude réalisée sur la chirurgie de l'otospongiose, il a été nécessaire entre 60 à 80 chirurgies pour obtenir des meilleurs résultats (Yung et al., 2006). De plus, la pratique quotidienne de la chirurgie de l'implant cochléaire est le facteur principal pour avoir une maîtrise sur la chirurgie otologique ainsi que l'implant cochléaire. N'ayant des études concernant à la courbe d'apprentissage de l'implantation cochléaire, nous avons choisi comme point de scission la réalisation des 50 implants cochléaires qui n'ont pas été atteints dans aucun cas dans les chirurgiens non expérimentés.

#### **V.4 Point d'entrée au tour basal de la cochlée**

Le point d'entrée à la rampe tympanique dans le tour basal de la cochlée est lié à la représentation mentale du tour basal de la cochlée. Nous avons trouvé une grande variabilité dans le choix du point d'entrée à la cochlée malgré la même photographie montrée aux chirurgiens des 5 rochers. Nous avons demandé avant l'expérience le point théorique d'entrée ou le choix préférentielle du chirurgien pour ouvrir la cochlée, tous les chirurgiens évalués ont choisi la fenêtre ronde comme point d'entrée idéal, cependant, notre étude montre une grande variabilité dans le choix du point d'entrée.

Le choix des chirurgiens dépend de la technique habituelle (dans le service ORL il est réalisé une ouverture et introduction du porte-électrodes par la fenêtre ronde dans la quasi-totalité des cas) et dans quelque cas isolés par une cochléostomie. Dans les cas des internes, il a été observé moins de variabilité dans le choix (73% par la fenêtre ronde) en revanche, les CCA et les experts ont été plus flexibles (40% par la fenêtre ronde dans chaque groupe).

Il existe deux façons pour représenter et nous orienter par rapport à un objet : 1) l'orientation dépendant du sujet (egocentrique), ce type d'orientation n'est pas adaptable dans le cas de changement d'orientation de l'objet ou des objets avec des formes variables (Turnbull et al., 1995), 2) l'orientation indépendante du sujet (allocentrique), donc, une description mentale de l'objet pour évaluer son orientation va être réalisée de façon automatique (Gibson et al., 1994 ; Marr 2010). Ces deux formes d'orientation sont utilisés simultanément mais la représentation de l'objet de façon allocentrique est plus adaptable sur des objets similaires (Bar 2001). Dans notre étude, les rochers sont des structures similaires mais la cochlée est une structure variable selon le patient.

Dans le cas de la représentation et orientation dans les objets partiellement cachés, nous utilisons la mémoire et la vraie connaissance de l'objet (Bar 2001), dans ce cas, nous utilisons la mémoire pour comparer des structures similaires étant l'expérience un facteur importante. Dans notre étude, la fenêtre ronde a été considérée comme point d'entrée de choix pour les chirurgiens (théorie), dans le cas des internes, cette type de orientation a été prédominante (egocentrique) et elle n'a pas été adaptable aux différents situations (le rocher, la région de la fenêtre ronde et la cochlée sont des structures variables), en revanche, la connaissance de l'anatomie va permettre de s'adapter au rocher et d'être plus flexible dans le choix du point d'entrée comme les chirurgiens experts.

La région de la fenêtre ronde est une région très complexe dans le point anatomique (Franz et al., 1987 ; Li et al., 2007), dans l'implantation cochléaire l'accès à la rampe tympanique est un objectif de l'ouverture cochléaire (Basura et al., 2010). Les experts ont choisi des points d'entrée assurant l'entrée directe vers la rampe tympanique et ils ont été flexibles dans le choix du point d'entrée en adaptant la position du point d'entrée selon le rocher. Dans le cas des experts, ils ont utilisé préférentiellement une façon allocentrique d'orientation en s'adaptant à l'anatomie de la région de la fenêtre ronde. Inversement, les internes qui ont choisi préférentiellement la fenêtre ronde comme point d'entrée et dans le cas de réaliser une cochléostomie, ils ont choisi des points d'entrée non adaptés (antérieur et supérieur), donc ils ont utilisé un type d'orientation egocentrique qui va dépendre de la mémoire (fenêtre ronde comme point théorique d'ouverture cochléaire) qui permet peu d'adaptation selon l'anatomie du rocher. Des plus, les CCA ont présenté des caractéristiques des experts (flexibilité dans le choix) et les internes (choix des points d'entrée inadaptés). Ainsi, l'orientation dans la région de la fenêtre ronde pour réaliser les implants cochléaires aurait une évolution, d'une orientation egocentrique centre sur le sujet qui permet peu d'adaptation vers une orientation allocentrique qui va permettre l'adaptabilité nécessaire pour faire face aux variations de l'anatomie du rocher.

#### **V.5 Erreur de représentation de l'axe d'insertion**

L'axe d'insertion passe par le centre de la rampe tympanique. D'où, la détermination de la position de la rampe tympanique dans le tour basal de la cochlée est importante pour la représentation de l'axe d'insertion. Dans l'imagerie utilisée systématiquement dans le bloc opératoire (scanner/IRM), nous pouvons déterminer la position du labyrinthe osseux avec le scanner et visualiser les liquides intracochléaires avec l'IRM, mais, nous ne visualisons pas la rampe tympanique dans la chirurgie quotidienne. Pour définir la position de la rampe tympanique, il faut reconnaître la position de la membrane basilaire. Elle est une membrane de < 100 µm d'épaisseur et elle n'est pas visible dans la chirurgie habituelle. Une étude préliminaire avec des images d'haute résolution permettrait une analyse des images d'IRM et du scanner que permettraient définir la position de la membrane basilaire, par contre dans l'actualité, la chirurgie est réalisée manuellement et la



connaissance de la position de la membrane basilaire ne changerait pas l'approche actuelle de la chirurgie de l'implant cochléaire.

La représentation mentale est un procès cognitif ayant 3 composantes : des entrées sensorielles, une confrontation avec le schéma mentale et la réalisation de la tâche (Marr 2010). Pour la représentation mentale dans l'espace est important d'avoir des informations visuelles (Sternberg 2007). Dans le cas d'une implantation cochléaire, il a peu de repères anatomiques sur l'orientation du tour basal de la cochlée et la seule information visuelle de l'intérieur de la cochlée est donnée par l'ouverture cochléaire (0,8 - 1 mm) pendant la chirurgie, ainsi, la cochlée est une structure variable dans son orientation dans le rocher et sur elle-même (Escude et al. 2006 ; Martinez-Monedero et al., 2011). Par conséquent, l'axe d'insertion n'est pas le même dans tous les rochers (Meshik et al. 2010).

Etant donné que la visualisation de repères sur l'orientation est un facteur important pour la représentation mentale. Nous avons étudié la reproductibilité de l'axe d'insertion réalisé sur un rocher. Admettant que la représentation mentale de l'axe d'insertion après la visualisation de la voie d'abord et de la région de la fenêtre ronde sur le même rocher ne change pas, la représentation de l'axe d'insertion ne devrait pas changer. Par contre, notre étude montre une variabilité non négligeable dans l'axe d'insertion avec des valeurs extrêmes importantes. D'où, l'absence de repères visuels est un facteur important pour la représentation mentale de l'axe d'insertion. Pour la représentation mentale, une stratégie allocentrique (centre sur le rocher) ne permet pas complètement de bien placer l'instrument dans l'axe d'insertion, en conséquence, notre étude montre que l'axe d'insertion n'est pas reproductible pour l'absence de repères visuels et il a une importante variation individuelle.

Nous avons observé que la représentation mentale de l'axe d'insertion est dépendante de l'expérience du chirurgien. De manière que les experts ont été plus performants en représenter l'axe d'insertion. Par contre, la représentation de l'axe d'insertion ayant une grande variabilité individuelle, est difficile de déterminer avec précision la représentation mentale de l'axe d'insertion, car dans tous les groupes, il a des résultats extrêmes, vers une bonne représentation ou vers une mauvaise représentation de l'axe d'insertion dans toutes les groupes, peut être dû à l'absence des repères visuelles de l'orientation de la cochlée. Malgré la variation individuelle, il est clair que l'expérience chirurgicale reste comme un facteur important pour la représentation de l'axe d'insertion.

La représentation mentale de l'axe d'insertion est une manière indirecte d'évaluer l'implantation cochléaire, une insertion le long de l'axe idéal permettrait des meilleurs résultats auditifs.

Etant donné à la variabilité de l'axe d'insertion et de l'anatomie cochléaire, un facteur important pour améliorer les connaissances et performances chirurgicales est l'entraînement soit sur des pièces anatomiques ou sur simulateurs (Edmond Jr et al., 1998). La cochlée est une structure parfois inconnue dans la chirurgie habituelle, l'exposition de la cochlée est un fait exceptionnel. Des dissections sur des pièces anatomiques ou virtuelles permettraient d'améliorer les connaissances sur la position de la rampe tympanique et l'orientation de la cochlée de manière d'améliorer la qualité chirurgicale des chirurgiens experts et les connaissances des chirurgiens non expérimentés, dans une chirurgie où les résultats postopératoires par rapport à l'audition dépendent de la qualité chirurgicale.

## **VI. Conclusion et perspectives**

Pour conclure, notre étude montre que la représentation mentale de l'axe d'insertion au tour basal de la cochlée est dépendante de l'expérience chirurgicale. Cette représentation de l'axe d'insertion a une grande variabilité individuelle et interindividuelle due à l'absence des repères visuels de l'orientation du tour basal de la cochlée au cours de la chirurgie et les variations de l'anatomie cochléaire. L'évaluation des conséquences de l'erreur par rapport à l'axe d'insertion peut permettre de diminuer les forces d'insertion et par conséquent d'améliorer potentiellement la qualité de la réhabilitation auditive chez les patients implantés.

Pour évaluer les conséquences d'une mauvaise représentation mentale de l'axe d'insertion, il a été planifié de réaliser des insertions sur des pièces anatomiques pour évaluer les forces d'insertion et la présence de translocation pendant les insertions. Ces insertions seront réalisés avec un outil d'insertion développé au laboratoire qui permet des insertions à une vitesse constante (Miroir et al., 2012 ; Nguyen et al., 2012). Les insertions seront réalisés avec le Robot développé également au laboratoire (RobOtol) qui couplé au Digipointeur permettra de réaliser des insertions selon un axe, présentant une erreur identique à celle qui a été faite par le chirurgien lors de cette étude. Cependant à ce jour, l'outil nécessite d'une adaptation pour permettre de réaliser telles insertions et évaluer les conséquences sur la cochlée. La prochaine étape serait dirigée vers la modélisation des structures intracochléaires et de l'axe d'insertion avant la chirurgie, vers une optimisation de l'insertion du porte-électrodes d'une manière robotisée et semi automatisée, adapté à l'anatomie particulière de chaque patient.

## VII. Références

- Adunka OF, Radloff A, Gstoettner WK, Pillsbury HC, Buchman CA. Scala tympani cochleostomy II: topography and histology. *The Laryngoscope*. 2007 Dec;117(12):2195–200.
- Adunka OF, Dillon MT, Adunka MC, King ER, Pillsbury HC, Buchman CA. Cochleostomy versus round window insertions: influence on functional outcomes in electric-acoustic stimulation of the auditory system. *Otol Neurotol*. 2014 Apr;35(4):613–8.
- Bar M. Viewpoint dependency in visual object recognition does not necessarily imply viewer-centered representation. *J Cogn Neurosci*. 2001 Aug 15;13(6):793–9.
- Basura GJ, Adunka OF, Buchman CA. Scala tympani cochleostomy for cochlear implantation. *Oper Tech Otolaryngol-Head Neck Surg* Dec 2010. 2010;21(4):218–22.
- Berrettini S, Forli F, Passeti S. Preservation of residual hearing following cochlear implantation: comparison between three surgical techniques. *J Laryngol Otol*. 2008 Mar;122(3):246–52.
- Bielamowicz SA, Coker NJ, Jenkins HA, Igarashi M. Surgical dimensions of the facial recess in adults and children. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg*. 1988 May;114(5):534–7.
- Briggs RJS, Tykocinski M, Stidham K, Roberson JB. Cochleostomy site: Implications for electrode placement and hearing preservation. *Acta Otolaryngol (Stockh)*. 2005 Jan;125(8):870–6.
- Edmond Jr CV, Wiet GJ, Bill Bolger L. VIRTUAL ENVIRONMENTS: Surgical Simulation in Otolaryngology. *Otolaryngol Clin North Am*. 1998 Apr 1;31(2):369–81.
- Erixon E, Högstorp H, Wadin K, Rask-Andersen H. Variational anatomy of the human cochlea: implications for cochlear implantation. *Otol Neurotol*. 2009;30(1):14–22.
- Escude B, James C, Deguine O, Cochard N, Eter E, Fraysse B. The Size of the Cochlea and Predictions of Insertion Depth Angles for Cochlear Implant Electrodes. *Audiol Neurotol*. 2006;11(1):27–33.
- Eshraghi AA, Van De Water TR. Cochlear implantation trauma and noise-induced hearing loss: Apoptosis and therapeutic strategies. *Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol*. 2006 Apr;288A(4):473–81.
- Finley CC, Holden TA, Holden LK, Whiting BR, Chole RA, Neely GJ, et al. Role of electrode placement as a contributor to variability in cochlear implant outcomes. *Otol Neurotol*. 2008 Oct;29(7):920–8.
- Franz BK, Clark GM, Bloom DM. Surgical anatomy of the round window with special reference to cochlear implantation. *J Laryngol Otol*. 1987;101(02):97–102.
- Gantz BJ, Turner C, Gfeller KE, Lowder MW. Preservation of hearing in cochlear implant surgery: advantages of combined electrical and acoustical speech processing. *The Laryngoscope*. 2005 May;115(5):796–802.
- Gibson BS, Peterson MA. Does orientation-independent object recognition precede orientation-dependent recognition? Evidence from a cuing paradigm. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*. 1994;20(2):299.
- Goodhill V. Joseph Toynbee Memorial Lecture, 1976. Tympanoplasty—four heterodox techniques. *Ann R Coll Surg Engl*. 1977;59(1):17.
- Grayeli AB, Esquia-Medina G, Nguyen Y, Mazalaigue S, Vellin J-F, Lombard B, et al. Use of anatomic or invasive markers in association with skin surface registration in image-guided surgery of the temporal bone. *Acta Otolaryngol (Stockh)*. 2009 Apr;129(4):405–10.
- Gstoettner W, Kiefer J, Baumgartner W-D, Pok S, Peters S, Adunka O. Hearing preservation in cochlear implantation for electric acoustic stimulation. *Acta Otolaryngol (Stockh)*. 2004;124(4):348–52.
- Havenith S, Lammers MJW, Tange RA, Trabalzini F, della Volpe A, van der Heijden GJMG, et al. Hearing preservation surgery: cochleostomy or round window approach? A systematic review. *Otol Neurotol*. 2013 Jun;34(4):667–74.
- Helbig S, Van de Heyning P, Kiefer J, Baumann U, Kleine-Punte A, Brockmeier H, et al. Combined electric acoustic stimulation with the PULSARCI(100) implant system using the FLEX(EAS) electrode array. *Acta Otolaryngol (Stockh)*. 2011 Jun;131(6):585–95.
- Lehnhardt E. [Intracochlear placement of cochlear implant electrodes in soft surgery technique]. *HNO*. 1993 Jul;41(7):356–9.
- Leonetti JP, Matz GJ, Smith PG, Beck DL. Facial nerve monitoring in otologic surgery: clinical indications and intraoperative technique. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 1990 Nov;99(11):911–8.
- Li PMMC, Wang H, Northrop C, Merchant SN, Nadol JB. Anatomy of the Round Window and Hook Region of the Cochlea With Implications for Cochlear Implantation and Other Endocochlear Surgical Procedures: *Otol Neurotol*. 2007 Aug;28(5):641–8.

- Marr D. Vision: a computational investigation into the human representation and processing of visual information. Cambridge, Mass.: MIT Press; 2010.
- Martinez-Monedero R, Niparko JK, Aygun N. Cochlear coiling pattern and orientation differences in cochlear implant candidates. *Otol Neurotol*. 2011 Sep;32(7):1086–93.
- Meshik X, Holden TA, Chole RA, Hullar TE. Optimal Cochlear Implant Insertion Vectors: *Otol Neurotol*. 2010 Jan;31(1):58–63.
- Miroir M, Nguyen Y, Kazmitcheff G, Ferrary E, Sterkers O, Grayeli AB. Friction force measurement during cochlear implant insertion: application to a force-controlled insertion tool design. *Otol Neurotol*. 2012 Aug;33(6):1092–100.
- Nguyen Y, Miroir M, Kazmitcheff G, Ferrary E, Sterkers O, Grayeli AB. From Conception to Application of a Tele-Operated Assistance Robot for Middle Ear Surgery. *Surg Innov*. 2011 Nov 10;19(3):241–51.
- Nguyen Y, Miroir M, Vellin J-F, Mazalaigue S, Bensimon J-L, Bernardeschi D, et al. Minimally Invasive Computer-Assisted Approach for Cochlear Implantation: A Human Temporal Bone Study. *Surg Innov*. 2011 Apr 18;18(3):259–67.
- Nguyen Y, Miroir M, Kazmitcheff G, Sutter J, Bensidhoum M, Ferrary E, et al. Cochlear implant insertion forces in microdissected human cochlea to evaluate a prototype array. *Audiol Neurotol*. 2012;17(5):290–8.
- Roland JT. A Model for Cochlear Implant Electrode Insertion and Force Evaluation: Results with a New Electrode Design and Insertion Technique: *The Laryngoscope*. 2005 Aug;115(8):1325–39.
- Roosli C, Sim JH, Möckel H, Mokosch M, Probst R. An artificial temporal bone as a training tool for cochlear implantation. *Otol Neurotol*. 2013 Aug;34(6):1048–51.
- Schütt C, Aschoff T, Winterhalder D, Thies M, Kretschmer U, Spiecker H. Approaches for recognition of wood quality of standing trees based on terrestrial laser scanner data. *ISPRS [Internet]*. 2004 [cited 2014 Aug 20]. Available from: <http://www.isprs.org/proceedings/xxxvi/8-w2/schuett.pdf>
- Skarzynski H, Lorens A, Piotrowska A, Anderson I. Preservation of low frequency hearing in partial deafness cochlear implantation (PDCI) using the round window surgical approach. *Acta Otolaryngol (Stockh)*. 2007 Jan;127(1):41–8.
- Sternberg RJ. *Manuel de psychologie cognitive: Du laboratoire à la vie quotidienne*. De Boeck Supérieur; 2007. p. 664
- Turnbull OH, Laws KR, McCarthy RA. Object recognition without knowledge of object orientation. *Cortex J Devoted Study Nerv Syst Behav*. 1995 Jun;31(2):387–95.
- Wang AY, Wang JT, Dexter M, Da Cruz M. The Vestibular Schwannoma Surgery Learning Curve Mapped by the Cumulative Summation Test for Learning Curve: *Otol Neurotol*. 2013 Oct;34(8):1469–75.
- Whiting BR, Holden TA, Brunsdon BS, Finley CC, Skinner MW. Use of computed tomography scans for cochlear implants. *J Digit Imaging*. 2008 Sep;21(3):323–8.
- Yung MW, Oates J, Vowler SL. The learning curve in stapes surgery and its implication to training. *The Laryngoscope*. 2006 Jan;116(1):67–71.