



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présentée et soutenue par :

Mehdi MEJDOUBI

Le mercredi 28 janvier 2015

Titre :

ETUDE EN TOMODENSITOMETRIE DU DEVELOPPEMENT DE L'OREILLE INTERNE
CHEZ LE FŒTUS HUMAIN

ED BSB : Anthropobiologie

Unité de recherche :

AMIS (Anthropologie Moléculaire et Imagerie de Synthèse), UMR 5288 du CNRS

Directeur(s) de Thèse :

Dr Fabrice DEDOUIT, Maître de Conférences des Universités, Toulouse, co-Directeur
Pr Norbert TELMON, Professeur des Universités, Toulouse, co-Directeur

Rapporteurs :

Pr Jean-François MEDER, Professeur des Universités, Paris, Rapporteur
Pr Gérald QUATREHOMME, Professeur des Universités, Nice, Rapporteur

Autre(s) membre(s) du jury :

ANNEE 2015

2015 TOU3

THESE

THESE en vue de l'obtention du grade

DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE III - PAUL SABATIER

Discipline ou spécialité : Anthropobiologie

**ETUDE EN TOMODENSITOMETRIE DU DEVELOPPEMENT DE L'OREILLE INTERNE
CHEZ LE FŒTUS HUMAIN**

Présentée et soutenue publiquement par **Mehdi MEJDOUBI** le 28 janvier 2015

JURY

Dr Fabrice DEDOUIT, Maître de Conférences des Universités, Toulouse, co-Directeur
Pr Jean-François MEDER, Professeur des Universités, Paris, Rapporteur
Pr Gérald QUATREHOMME, Professeur des Universités, Nice, Rapporteur
Pr Norbert TELMON, Professeur des Universités, Toulouse, co-Directeur

Ecole Doctorale : Biologie - Santé - Biotechnologies

Unité de recherche : AMIS (Anthropologie Moléculaire et Imagerie de Synthèse), UMR 5288
du CNRS

RESUME

Objectifs :

L'oreille interne atteint sa taille et sa configuration adulte entre 18 et 25 semaines d'aménorrhée (SA) selon la littérature. Notre objectif est d'étudier le développement morphologique osseux de l'oreille interne du fœtus humain. En particulier, ont été étudiées des distances cochléo-vestibulaires standards, l'angulation entre les 3 canaux-semi-circulaires et le positionnement du vestibule dans le rocher.

Matériel et Méthode :

Notre institution dispose d'une banque de fœtus humains dont l'âge (de 20 à 40 SA), le sexe et le contexte du décès sont connus. Ils ont été étudiés par tomographie assistée par ordinateur avec des coupes infra-millimétriques et un filtre osseux. Les images ont été exploitées grâce au logiciel Amira 5.2.2.

13 dimensions cochléo-vestibulaires standards ont été mesurées chez 153 fœtus. L'angulation entre les 3 canaux semi-circulaires a été mesurée chez 54 fœtus. L'ossification du rocher et le positionnement du vestibule ont été étudiés chez 54 fœtus.

L'analyse statistique a été réalisée grâce au logiciel R.

Résultats :

Il n'y a pas de dimorphisme sexuel, ni de différence droite-gauche dans les 13 distances mesurées. 8 mesures cochléo-vestibulaires (tour basal de la cochlée longueur et diamètre, vestibule longueur et largeur, cochlée hauteur et largeur) n'évoluent pas en taille de 20 à 40 SA. Leur taille est analogue à celle de l'adulte selon les données de la littérature. L'îlot osseux du canal semi-circulaire latéral croît jusqu'à 25 SA puis atteint un plateau. 4 distances (de l'aqueduc de la cochlée, du conduit auditif interne) sont corrélées à l'âge foetal.

L'angle entre les canaux semi-circulaires est proche de 90°, malgré de larges écarts physiologiques, et n'évolue pas entre 21 et 40 SA. Il n'y a pas de dimorphisme sexuel, ni de différence intra- ou inter-observateur. Le centre du vestibule est remarquablement stable dans son positionnement anatomique par rapport aux 3 pointes du rocher (dans un plan bi-dimensionnel) pendant le développement foetal.

Conclusion :

Conformément aux données de la littérature, la croissance cochléo-vestibulaire se termine à 21 SA ou moins. Certains éléments de l'oreille interne (conduit auditif interne, aqueduc de la cochlée) croissent avec l'os pétreux et évoluent avec l'ossification du rocher. La configuration tridimensionnelle adulte des angles semi-circulaires est également atteinte dès 21 SA. L'angulation proche de l'orthogonalité répond probablement à un fonctionnement vestibulaire optimal. Le vestibule est remarquablement stable dans son positionnement dans le rocher évoquant une détermination génétique forte.

Notre série est quantitativement la plus importante jamais publiée dans la littérature.

ABSTRACT:

Objectives:

The inner ear reaches its final configuration and its adult size during fetal life. According to the literature, this occurs between 18 and 25 weeks of amenorrhea (WA). Our goal is to clarify the course of inner ear bony development in human fetuses. Specifically, we will focus on a set of standard cochleo-vestibular measurements, on the angulation between semi-circular canals and on vestibular positioning within the petrous bone.

Material and Methods:

Our institution hosts a collection of human fetuses of known age and known cause of death. They were CT scanned with sub-millimetric slices and bone filter. Imaging files were studied with Amira™ 5.2.2 software.

We first studied 13 measurements in the inner ear of 153 fetuses from 21 to 40 WA. We also studied semi-circular canals orientation in the temporal bone of 54 human fetuses. We then studied petrous ossification and the positioning of the vestibular ear in petrous bone of 54 human fetuses.

Statistical analysis was performed with R™ software.

Results:

We found no side-related differences or sexual dimorphism in the 13 measurements. 8 cochlear and vestibular bone measurements (basal turn of the cochlea width and diameter, vestibular ear width and height, cochlear width and height) did not show growth from 21 to 40 WA. These measures are similar to those of adults in literature. The lateral semicircular canal bony island grows until 25 WA. Internal auditory canal and cochlear aqueduct growth are correlated with gestational age.

We found mean angles between the three semi-circular canals close to orthogonality, despite important physiologic variations. Inter-semi-circular canals angles did not change significantly from 21 to 40 WA. There was no difference of angulation between males and females, and no intra- or inter-observer variability. The center of vestibular ear has a stable positioning within the three angles of petrous bone during fetal gestation.

Conclusions:

In accordance with literature, we confirm that the cochlea and semi-circular canals 3D configuration reaches their adult size at or before 21 WA. Some parts of the inner ear (cochlear aqueduct, IAC) continue to grow with petrous bone and evolve with its ossification. As often described in the literature, the semi-circular canals angles are close to orthogonality, probably reflecting an optimal vestibular function configuration. The remarkable stability of vestibular positioning is in favour of a strong genetical determination. To the best of our knowledge, our series is the largest series of human fetal inner ear ever published.

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont à mes parents, à ma sœur (et sa petite famille), à ma grande famille, et à mes amis qui m'ont toujours apporté un soutien sans faille, tellement précieux pour persévérer dans notre voie scientifique.

Je remercie également :

Les équipes d'imagerie médicale du CHU de Martinique qui m'ont accompagné dans le formidable challenge de conduire un service puis un pôle hospitalo-universitaire; challenge d'autant plus excitant que les temps sont durs pour l'hôpital public,

Le Pr Régis Duvauferrier pour son aide et ses encouragements, le Dr Sylvie Colombani pour sa positivité au travail et dans la vie, le Dr Alessandro Arrigo pour sa culture (générale et médicale).

Mes confrères médecins (maîtres, internes, co-externes, co-internes, co-chefs), à la fois élèves et maîtres, sans qui la médecine française n'aurait pas atteint son niveau d'excellence.

L'environnement universitaire en France qui continue d'exceller, malgré un contexte difficile,

L'équipe de Médecine Légale du CHU de Toulouse pour son accueil chaleureux,

Je remercie mes maîtres et membres du jury :

- A Monsieur le docteur Fabrice Dedout, qui a eu l'idée de me confier ce travail
- A Monsieur le professeur Jean-François Meder, qui perpétue l'école française de neuroradiologie
- A Monsieur le professeur Gérald Quatrehomme, qui m'honore par sa présence
- A Monsieur le professeur Norbert Telmon, dont la motivation rejaillit sur ses équipes

SOMMAIRE

Index	page 3
I INTRODUCTION	page 4
II ANATOMIE	page 5
Labyrinthe osseux	page 7
Labyrinthe membraneux	page 10
Particularités pédiatriques	page 19
Radioanatomie	page 20
III ONTOGENESE ET PHYLOGENESE	page 22
Embryologie	page 22
Phylogénèse	page 29
IV PHYSIOLOGIE ET PHYSIOPATHOLOGIE	page 38
Audition	page 38
Equilibre	page 39

Pathologie	page 42
V MATERIEL ET METHODE	page 46
Morphométrie de l'oreille interne	page 48
Angulation des CSC	page 51
Positionnement du vestibule	page 52
VI RESULTATS	page 53
Morphométrie de l'oreille interne	page 53
Angulation des CSC	page 56
Positionnement du vestibule	page 58
VII DISCUSSION	page 60
Morphométrie de l'oreille interne	page 64
Angulation des CSC	page 71
Positionnement du vestibule	page 78
CONCLUSION	page 80
VIII REFERENCES	page 81

Index :

CAI = Conduit auditif interne

CAE = Conduit auditif externe

Capsule otique = labyrinthe osseux

CSC = canal semi-circulaire (latéral= CSCL ; antérieur= CSCA ; postérieur= CSCP)

Common crus = partie commune entre bras médial du CSCA et bras supérieur du CSCP

Labyrinthe = Oreille interne (antérieur=cochlée ou postérieur=vestibule+CSC)

Lame spirale = lame osseuse séparant la cochlée en 2 parties ou rampes ; son bord interne se fixe au modiolus, son bord externe est libre

Membrane = paroi conjonctivo-épithéliale

Membrane de Reissner = sépare rampe vestibulaire du canal cochléaire

Modiolus = centre osseux de la cochlée de forme conique, autour duquel s'enroule la cochlée

Ontogenèse = Développement progressif d'un individu particulier depuis sa conception à sa mort

OI= Oreille interne

Phylogénèse = Développement évolutif de l'espèce

SA= Semaine d'aménorrhée

TDM = tomodensitométrie

Utricule = cavité elliptique ; comprend les 5 ouvertures des 3 CSC (1 commune à CSCS et CSCP)

I INTRODUCTION

L'appareil cochléo-vestibulaire est un organe primordial dans l'équilibre et indispensable dans l'audition. Il est présent chez l'ensemble des mammifères. Il présente des caractéristiques développementales exceptionnelles chez l'humain puisque c'est le seul organe à atteindre sa configuration et sa taille adulte avant la naissance.

Les données de la littérature estiment que la taille et la configuration adulte sont atteintes entre 18 et 25 SA (Richard, Nemzek, Jeffery).

Les études chez le fœtus humains sont peu nombreuses et restent de surcroît marquées par des échantillons avec de faibles effectifs. Ceci s'explique pour des raisons éthiques ainsi que pour des raisons techniques liées aux difficultés des études histologiques.

La radiologie standard et les techniques apparentées (tomographie), bien qu'anciennes ne pouvaient rivaliser avec les dissections anatomiques (et les différentes techniques y afférentes : moulage, ...) qui restent les références.

Ce n'est que récemment que 2 techniques d'imagerie ont révolutionné l'étude de l'OI. La tomодensitométrie (depuis les années 1980) et l'IRM (depuis les années 1990) se sont largement diffusées en recherche et en pratique clinique. Elles permettent d'analyser des organes avec une résolution spatiale infra-millimétrique tout en respectant leur intégrité.

Grâce à ces techniques relativement récentes, des études ont été possibles avec des échantillons plus larges et plus diversifiés. Jusque il y a peu, la neuro-anatomie tridimensionnelle de l'os temporal restait encore à mieux connaître (Swartz 1996). Mais le développement de l'imagerie en coupe, a permis de combler des lacunes et sa précision, toujours en amélioration, permet de compléter utilement les données histologiques.

Notre institution dispose d'une importante banque de fœtus humain âgés de 20 à 40 SA. La tomодensitométrie, examen d'accès facile, permet l'analyse précise de l'os de l'oreille interne dont la densité est particulièrement élevée dans la région otique.

Notre objectif est d'étudier le développement osseux de l'oreille interne chez le fœtus humain de 20 à 40 SA.

II ANATOMIE

A- ANATOMIE ADULTE

L'os temporal est constitué de 3 parties distinctes : l'écaïlle (ou partie squameuse), le rocher (ou partie pétreuse) et la partie zygomatique. A ce titre, il participe à la formation de la base du crâne, de la voûte du crâne et de la face.

Le Rocher est la partie qui nous intéressera ici puisqu'il contient la totalité de l'OI.

1) ROCHER

Le rocher est l'os dans et autour duquel se dispose l'organe sensoriel de l'oreille. Il a une forme pyramidale quadrangulaire à sommet interne et 4 faces :

- antéro-supérieure formant le plancher moyen du crâne et le toit de l'OI et de l'oreille moyenne; elle est marquée par des reliefs : éminence arquée (liée au CSC supérieur), tegmen tympani (recouvrant la cavité tympanique), l'impression trigémينية (dépression). Elle est percée par les orifices des nerfs grand et petit pétreux.
- postéro-supérieure : laisse passer le CAI (nerfs VII et VIII), l'aqueduc vestibulaire (fossette unguéale), l'aqueduc cochléaire et la fossa subarcuata (ouverture du canal pétro-mastoïdien)
- antéro-inférieure : tympanal et gouttière tubaire (empreinte de la trompe d'eustache)
- postéro-inférieure : canal carotidien et partie pétreuse du foramen jugulaire, fossette pyramidale (orifice de sortie du nerf tympanique), foramen stylo-mastoïdien (sortie du nerf facial et de l'artère stylo-mastoïdienne), processus styloïde (point d'attache de muscles et de ligaments).

La pneumatisation de l'os temporal se fait progressivement après la naissance et s'effectue en plusieurs poussées jusqu'à l'âge adulte. Les cellules aériques sont bordées par une muqueuse épithéliale séparée de l'os par une fine couche de tissu conjonctif. Plusieurs régions de cellules aériques peuvent être distinguées avec par ordre décroissant de pneumatisation : squamomastoïdienne, processus mastoïde, apex pétreux, périlabyrinthique, accessoire (squameuse, zygomatique, styloïde et occipitale) et péritymbaire (Virapongse). Une étude tomodynamométrique de 141 os temporaux chez 100 individus (Virapongse) a révélé un haut degré de symétrie et l'absence de différence de pneumatisation liée au sexe. Elle décrit que les plus grandes cellules sont périphériques (en dehors de l'antre). Les cellules géantes se situent plus souvent au niveau de l'apex pétreux

lequel est pneumatisé dans 35%.

2) OREILLE MOYENNE

La cavité tympanique est une cavité aérique en forme de sablier. Elle communique avec l'antre (plus grande cellule mastoïdienne) par le biais de l'aditus ad antrum. On peut la diviser en 3 étages sur un plan coronal par 2 lignes horizontales (une passant par le toit du CAE et l'autre par le plancher du CAE).

Entre le toit de la cavité tympanique (ou tegmen tympani) et la ligne passant par le tit du CAE, on décrit l'épitympan (ou attique) lui-même divisé en partie latérale et médiale par la tête du marteau. L'épitympan est limité latéralement par le mur de la logette qui donne insertion à son extrémité (sur le sillon tympanique) à la pars flacida de la membrane tympanique. Le toit est généralement très mince et est le siège de la fissure pétro-squameuse.

Entre les 2 lignes horizontales, on décrit le mésotympan.

Entre la ligne inférieure et le plancher de la cavité, on décrit l'hypotympan qui communique avec le nasopharynx par le biais de la trompe auditive (d'Eustache).

La paroi interne (labyrinthique) de la cavité tympanique est importante car est la zone de communication avec l'OI. Plusieurs reliefs sont identifiables de haut en bas : le CSCL, le canal de la 2^{ème} portion du VII, le canal du muscle du marteau, la fenêtre vestibulaire (ou ovale), le promontoire, la fenêtre cochléaire (ou ronde).

La cavité tympanique contient la chaîne ossiculaire composée de 3 osselets maintenus par des ligaments et des tendons. Ils se joignent par 2 articulations : incudo-malléaire (située dans l'épitympan) et stapédo-vestibulaire (située dans le mésotympan).

Le marteau (ou malleus) est constitué d'un manche (enchâssé dans la membrane tympanique) et d'une tête (maintenue par les ligaments supérieur, antérieur, latéral et par le muscle du marteau) qui s'articule avec le corps de l'enclume.

L'enclume (ou incus) est constitué d'un corps, d'une courte apophyse et d'une longue apophyse qui s'articule avec le bouton de l'étrier au niveau du processus lenticulaire.

L'étrier (ou stapes) est constitué du bouton, de 2 branches (antérieure et postérieure, plus épaisse) et de la platine qui ferme la fenêtre ovale.

3) OREILLE INTERNE

Elle est constituée de 3 parties :

- l'appareil cochléaire : cochlée et l'aqueduc cochléaire
- l'appareil vestibulaire (comprenant le vestibule, l'aqueduc vestibulaire et les 3 CSC)
- le conduit auditif interne

D'emblée, il faut distinguer l'anatomie osseuse du labyrinthe qui comprend, sans se confondre totalement avec, la partie membraneuse.

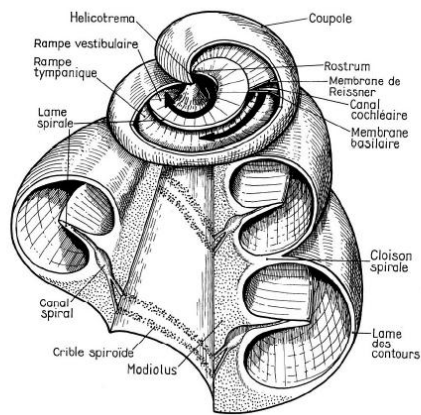
3a- Labyrinthe osseux

Celui-ci est constitué de 5 espaces osseux (le vestibule, 3 CSC, la cochlée) et a probablement la plus forte densité osseuse de l'organisme (Swartz 1996a).

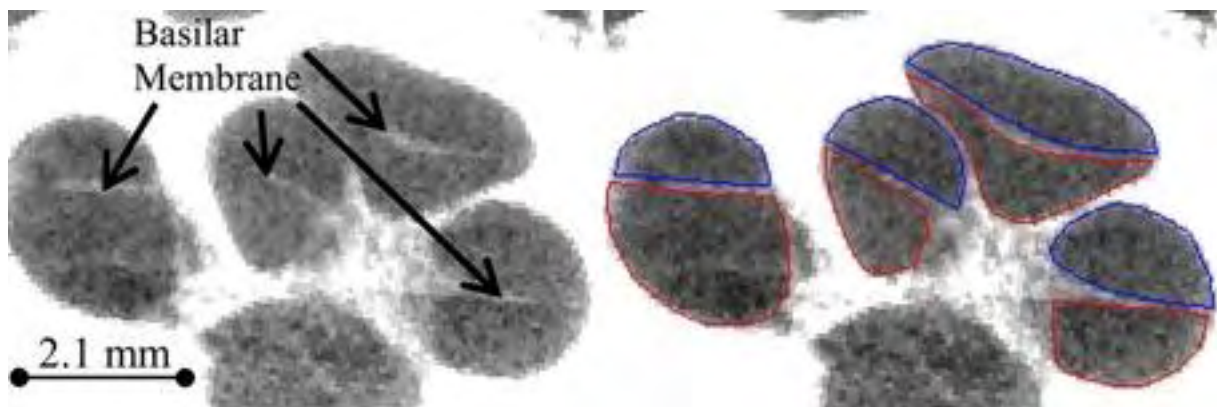
Cochlée

La cochlée mesure 30 à 32 mm de long (Swartz 1996) et est constituée de 3 canaux contenant un liquide : scala media (endolymphe), scala vestibuli et scala tympani (pérlimpe). La scala media est séparée des autres scala par des membranes : vestibulaire avec la scala vestibuli, et basilaire avec la scala tympani. La scala media (ou rampe médiane ou canal cochléaire) est reliée au saccule par le « ductus reuniens ». Il se termine à l'apex de la cochlée. Il est séparé de la rampe vestibulaire par la lame réticulaire. L'endolymphe remplit les CSC, l'utricule et la saccule. La pérlimpe baigne la surface externe du saccule et de l'utricule dans le vestibule. L'organe spiralé de Corti est localisé dans la scala media, s'appuyant sur la membrane basilaire (qui prolonge la lame osseuse spirale et mesure 34 mm de longueur).

La base de la cochlée s'ouvre avec la fenêtre ronde. L'aqueduc de la cochlée mesure 13 mm, il relie la base de la cochlée à l'endocrâne et contient du liquide périlymphatique. La cochlée communique avec le CAI par le modiolus. La spirale de la cochlée n'est pas dans un plan, elle s'entoure (2.5 à 2.75 spires) autour d'un cône osseux (modiolus ou columelle) mesurant 3 mm de hauteur et à sa base. Une lame osseuse (ou lame spirale) fait saillie dans la spirale cochléaire à mi-hauteur et sur la moitié de sa largeur. Cette lame osseuse est la voie de passage du contingent nerveux. Sur son bord libre, s'attache la membrane basilaire horizontale et la membrane de Reissner, oblique. La spire cochléaire est ainsi séparée en trois : La rampe vestibulaire au dessus et en dedans, la rampe médiane (ou canal cochléaire) au dessus et en dehors, la rampe tympanique en dessous.



D'après Legent : Vue du limaçon



D'après Noble : Etude en μ TDM des scala tympani (en rouge) et scala vestibuli (en bleu)

A l'apex de la spire (hélicotréma), les rampes vestibulaire et tympanique communiquent par un petit orifice. A la base, la rampe vestibulaire s'ouvre dans le plancher du vestibule en regard de la fenêtre ovale ; la rampe tympanique s'ouvre avant et sous le vestibule, en regard de la fenêtre ronde. Celle-ci n'est d'ailleurs ronde que dans 55% des cas chez l'adulte et mesure de 1.2 à 1.7 mm de diamètre (Bonaldi).

Vestibule et CSC

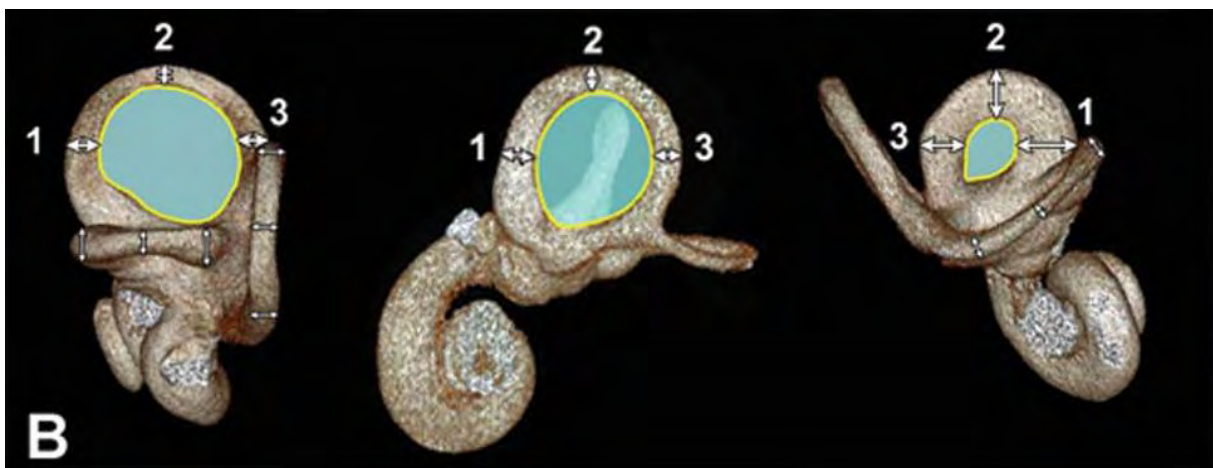
Le vestibule osseux est de forme grossièrement ovale et est séparé en dedans du CAI par la lame criblée ; en dehors, il s'ouvre avec la fenêtre ovale. L'aqueduc vestibulaire relie le

vestibule à l'endocrâne, où il s'ouvre dans la fossette unguéale (1 cm en arrière du CAI), et contient le canal endolymphatique.

Contrairement à ce qu'indique son nom, le CSC constitue plutôt 2/3 d'un cercle. De plus, il est en partie elliptique (Curthoys).

Lee et al. (2013) ont mesuré la partie commune des CSCA et CSCP (ou « common crus ») à 2mm de hauteur pour 1.5 à 1.9 mm de large. Ils ont fourni différentes mesures des CSC, à partir de 40 os pétreux, reproduites dans le tableau suivant :

	CSCSA	CSCP	CSCL
Hauteur (mm)	6.5	6.7	4.9
Largeur (mm)	8.0	7.7	6.5
Diamètre (mm)	0.7 à 1.2	0.9 à 1.5	0.8 à 2.1
Rayon (mm)	3.6	3.6	2.9
Périmètre du cercle (mm)	18.6	18.0	10.3
Surface interne (mm ²)	24.3	19.6	7.5



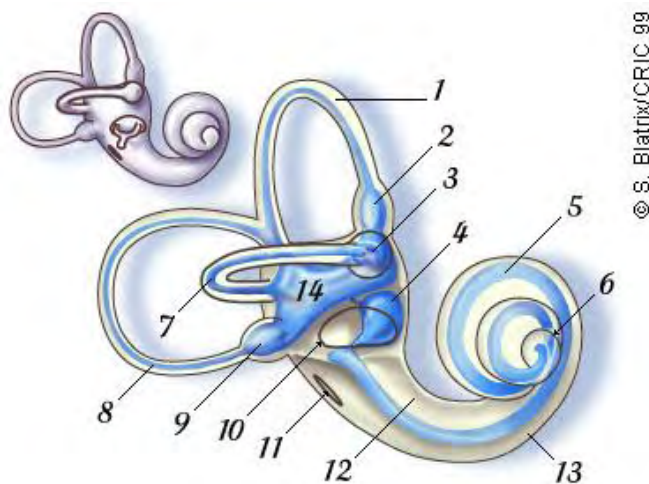
D'après Lee : Surface délimitée par les CSC avec aspect de cercle distordu

Autres canaux :

- canal singulaire (nerf ampullaire postérieur qui provient de l'ampoule du CSCP) passe sous la fenêtré ronde pour rejoindre la paroi postérieure du CAI, à 1 mm du fond, près du plancher, où il s'ouvre dans le foramen singulaire (ou de Morgagni).
- canal pétromastoiïdien (vestige de la fossa subarcuata) passe à travers l'arc formé par le CSCA, et contient un repli méningé et quelques vaisseaux dont l'artère et la veine subarcuata (qui vascularisent la dure-mère).

3b- Labyrinthe membraneux

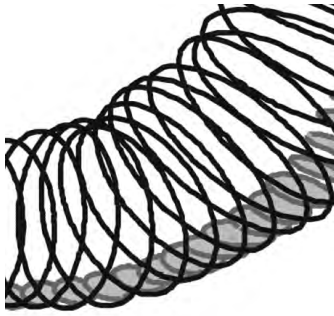
Il est constitué de 6 organes interconnectés (cochlée, saccule, utricule, 3 CSC) inclus dans le labyrinthe osseux. Le CSC membraneux occupe moins du tiers du diamètre du CSC osseux (Swartz 1996b).



- | | | |
|-----------------------------|-------------------------------|------------------------|
| 1. Canal antérieur | 6. Hélicotrème | 11. Fenêtre ronde |
| 2. Ampoule (du même canal) | 7. Canal latéral (horizontal) | 12. Rampe vestibulaire |
| 3. Ampoule (csc horizontal) | 8. Canal postérieur | 13. Rampe tympanique |
| 4. Saccule | 9. Ampoule (csc postérieur) | 14. Utricule |
| 5. Canal cochléaire | 10. Fenêtre ovale | |

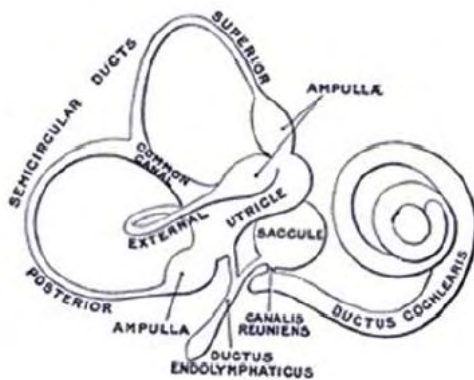
Les CSCA et CSCP ont un trajet commun à leur partie postérieure externe. Les 3 CSC présentent un renflement court, à leur origine antérieure, dénommé l'ampoule.

Ifediba et al (2007) ont, à partir de sections histologiques, mesuré la surface (« cross-sectional area») du labyrinthe membraneux et extrapolé un modèle pour mesurer le plan du CSC. Ils ont constaté un alignement des plans des labyrinthes osseux et membraneux avec une différence d'angulation de seulement $3,48^\circ (+-1,89^\circ)$. Puis ils ont calculé la dynamique de l'endolymphe à partir d'un modèle mathématique à 3 canaux. Face à un déplacement 3D de la tête, les 3 canaux sont activés en même temps avec une réponse nerveuse maximale dans l'un d'entre eux.



D'après Ifediba : Le canal membraneux (en gris) est plaqué au niveau de la courbure externe du canal osseux.

L'utricule (d'où partent les 3 CSC) et le saccule (entre utricule et tour basal de la cochlée) sont contenus dans le vestibule osseux. Ils donnent naissance à un canal chacun qui vont fusionner pour donner un canal commun, le canal endolymphatique qui va cheminer dans l'aqueduc du vestibule pour donner le sac endolymphatique à la face postérieure de la pyramide pétreuse (Veillon).



3c- Organes sensoriels

Ils sont situés dans le labyrinthe membraneux au niveau :

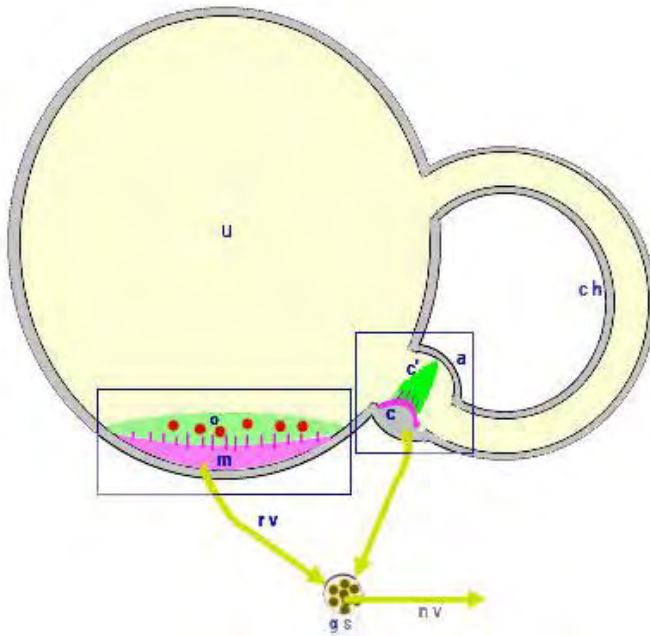
- des macules de l'utricule et du saccule (organes otolithiques)
- des ampoules des CSC
- de l'organe de Corti du canal cochléaire

Cellules vestibulaires :

Les cellules ciliées du saccule et de l'utricule sont au nombre de 4000 environ, dont les extrémités (ou stéréocils) sont plantées dans la membrane otolithique, structure gélatineuse

plane sur laquelle repose les otolithes ou statoconies (cristaux de carbonate de chaux).

Les cellules ciliées des ampoules sont au nombre de 23000 environ, dont les stéréocils sont plantés dans la cupule, structure gélatineuse de forme conique (moins dense et plus mobilisable que la précédente).



u= utricule

ch= CSC horizontal

a= ampoule du CSC

D'après <http://www.dralami.edu/anatomie/Vestibulor/Vestibulo.htm>

c= crête

m= macule

gs= ganglion de scarpa

c' =

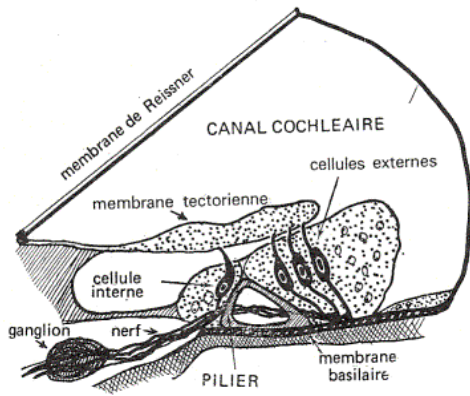
o= otolithes (en rouge)

nv= nerf vestibulaire

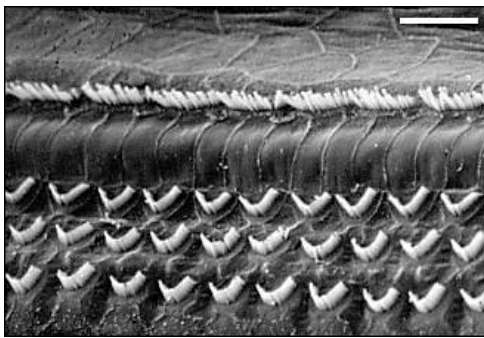
Organe de Corti :

C'est un épithélium reposant sur la membrane basilaire et constitué de cellules de soutien et de cellules sensorielles. Les cellules de soutien sont de plusieurs types : Piliers, Deiters, Hensen, ... Les cellules sensorielles sont de 2 types. Les cellules ciliées internes, au nombre d'environ 3500, sont disposées en une rangée et comportent à leur extrémité des stéréocils reliés entre eux. Ceux-ci ont des contacts synaptiques avec des neurones afférents. Les cellules ciliées externes, au nombre d'environ 15000, sont disposées en 3 rangées et comportent également des stéréocils disposés en W. Elles ont peu de synapses et sont en fait des cellules motrices capables de mouvements de contraction-élongation grâce à des échanges hydriques.

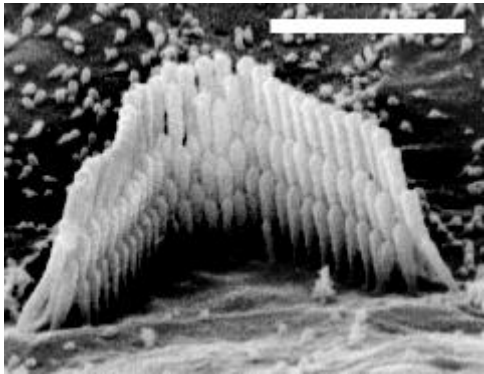
L'organe de Corti est chapeauté par la membrane tectorienne (structure gélatineuse) sur laquelle s'attachent les stéréocils des CCE. Une vibration de la membrane tectorienne va mobiliser les CCE, qui vont déplacer l'endolymphe, laquelle va stimuler à son tour les CCI.



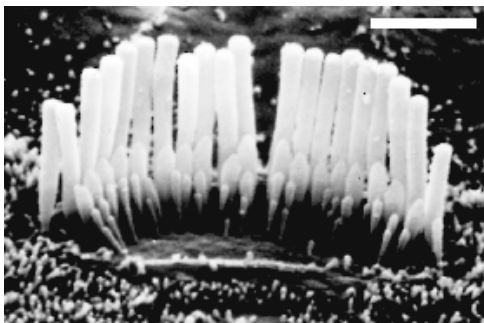
D'après <http://symphoniescientifique-tpe.e-monsite.com>: Organe de Corti



D'après <http://symphoniescientifique-tpe.e-monsite.com>: Cellules ciliées en ME



D'après M. Lenoir, CCE



D'après M. Lenoir, CCI

3d- Liquides labyrinthiques

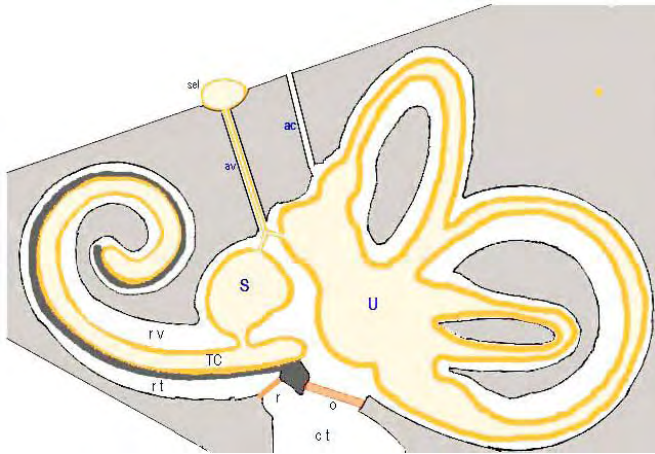
Le labyrinthe membraneux est séparé du labyrinthe osseux par la périlymphe. Celle-ci est véhiculée entre les espaces sous-arachnoïdiens et la rampe tympanique par l'aqueduc de la cochlée.

Les volumes liquidiens de l'OI sont extrêmement faibles de l'ordre de 225 μ l (rampe tympanique 44 μ l, rampe vestibulaire 31.5 μ l, rampe médiane ou canal cochléaire 7.7 μ l).

La composition ionique différente des 2 liquides détermine un gradient électrique.

Tableau sur les caractéristiques des liquides labyrinthiques (www.cochlea.eu)

		Périlymphe	Endolymphe
Origine		P. tympanique= LCR P. vestibulaire= plasma	Sécrétion par strie vasculaire à partir de la périlymphe
Localisation		Entre labyrinthe osseux et membraneux	Rampe médiane (ou canal cochléaire) CSC, saccule, utricule
Volume (μl)		142	83
Composition	Na (mM)	150	1
	K (mM)	5	150
	Cl (mM)	110	130
	Ca (mM)	1.2	0.02
	Protéines (g/l)	1	0.1
	Glucose (mM)	4	0.5
	pH	7.4	7.4
	Osmolarité (mosm/l)	290	315
	Potentiel (mV)	0	80



rt= rampe tympanique

s= sacculle

rv= rampe vestibulaire

u= utricule

r= fenêtre ronde

av= aqueduc vestibulaire

o= fenêtre ovale

ac= aqueduc cochléaire

D'après <http://www.dralami.edu/anatomie/Vestibulor/Vestibulo.htm>

3e- CAI et paquet acoustico-facial

Il correspond à une déformation osseuse concave du rocher où s'invagine la méninge pour laisser passer le paquet acoustico-facial. Celui-ci est composé de 4 contingents nerveux : vestibulaires (position postérieure) supérieur et inférieur, cochléaire (position antéro-inférieure) et facial (position antéro-supérieure).

Le nerf vestibulaire inférieur est constitué de la fusion du nerf sacculaire et du nerf ampullaire postérieur (CSCP).

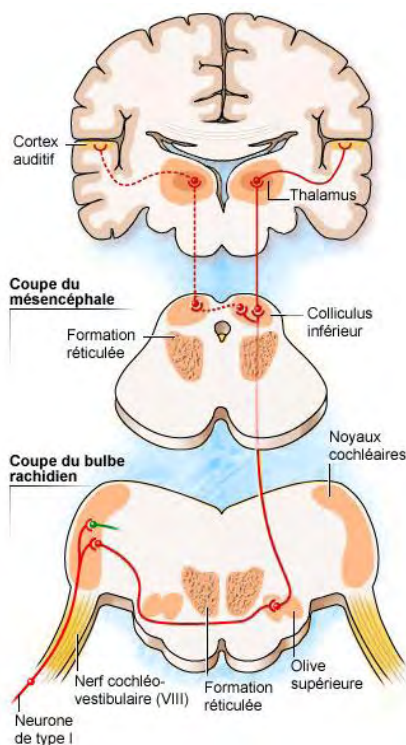
Le nerf vestibulaire supérieur (anciennement utriculo-ampullaire) provient de l'utricule et des ampoules des CSCA et CSCL. Il est séparé du nerf facial par une crête osseuse verticale, la « Bill's Bar » (Dulguerov).

Les nerfs vestibulaires supérieur et inférieur s'unissent dans le ganglion de Scarpa pour former le nerf vestibulaire.

3f- Centres cérébraux

Voies auditives

-Ascendantes : Les nerfs cochléaire et vestibulaire se rejoignent dans le CAI pour former la VIII^e paire crânienne. Ce dernier pénètre dans le tronc au niveau de la jonction bulbo-protubérantielle. Les axones cochléaires rejoignent les noyaux cochléaires (à la partie basse du pont en dehors des pédoncules cérébelleux inférieurs) qui s'articulent avec l'olive supérieure et le lemnisque latéral (Veillon). Les noyaux cochléaires adressent des fibres controlatéralement, puis le long du lemnisque latéral vont rejoindre le collicule inférieur. Ce dernier va être relié au corps géniculé médial à partir duquel vont partir des radiations auditives vers le cortex temporal supérieur (gyrus de Heschl et planum temporal).



D'après www.cochlea.eu

-Descendantes : Ces voies, parallèles aux précédentes, partent du cortex vers le collicule inférieur, puis l'olive supérieure. A partir de laquelle part le faisceau olivocochléaire de Rasmussen (Veillon) dont les dendrites se terminent au niveau des cellules ciliées externes. Elles permettent une régulation rétroactive pour s'adapter au bruit de voisinage, notamment dans un but réflexe protecteur en cas de traumatisme sonore.

Voies vestibulaires

-Ascendantes :

Fibres primaires : Le ganglion de Scarpa contient les corps cellulaires des neurones primaires bipolaires (Veillon). Près du méat, le nerf vestibulaire s'unit au nerf cochléaire pour former la VIII^e paire crânienne qui traverse l'angle ponto-cérébelleux pour rejoindre les noyaux vestibulaires à la partie basse de la protubérance.

Le complexe des noyaux vestibulaires, situé sous le plancher du 4^{ème} ventricule, comprend 4 noyaux (supérieur, inférieur, médial et latéral). Il reçoit des fibres vestibulaires et des afférences visuelles, proprioceptives (spinales) mais aussi des afférences commissurales, cérébelleuses et corticales. Les noyaux vestibulaires controlatéraux sont reliés entre eux (Dulguerov) dans une interaction essentiellement inhibitrice.

Le noyau latéral ne reçoit pas des fibres primaires mais des fibres afférentes issues des cellules de Purkinje du vermis antérieur (Veillon).

Des fibres vestibulocérébelleuses évitent le complexe vestibulaire et se dirige directement vers le nodule et l'uvule.

Fibres secondaires : Elles viennent des noyaux vestibulaires, où elles sont connectées monosynaptiquement aux noyaux primaires, et se projettent homolatéralement vers le nodule, l'uvule, flocculus

-Descendantes :

Les fibres provenant du cortex vers les noyaux vestibulaires sont inhibitrices des réflexes vestibulaires pendant des mouvements volontaires (Veillon).

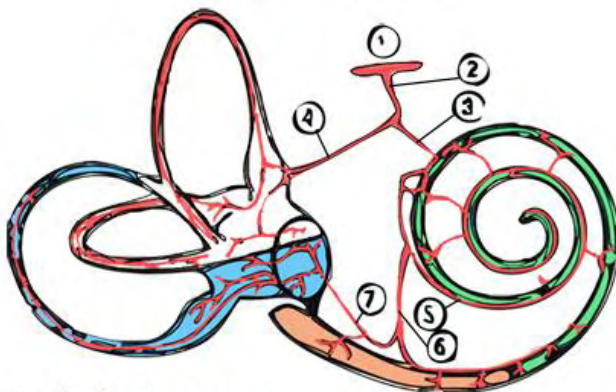
3g- Vascularisation de l'OI

La vascularisation artérielle dépend de l'artère labyrinthique ou auditive interne qui naît, le plus souvent dans le CAI, de l'artère cérébelleuse moyenne (AICA). Celle-ci naît du tronc basilaire. De nombreuses variantes anatomiques existent de façon physiologique.

Le diamètre de l'artère labyrinthique est de 200 μm (Veillon) et elle va se diviser en :

- artères cochléaire commune (qui va vasculariser la cochlée, une partie de l'utricule et du saccule)
- artère vestibulaire antérieure (qui va irriguer une partie de l'utricule et du saccule, le CSCA et CSCP membraneux).

Vascularisation de l'oreille interne



- 1 - Artère cérébelleuse moyenne
- 2 - Artère auditive interne
- 3 - Artère cochléaire
- 4 - Artère vestibulaire antérieure
- 5 - Artère cochléaire propre
- 6 - Artère vestibulo-cochléaire
- 7 - Branche vestibulaire de l'artère vestibulo-cochléaire
- 8 - Branche cochléaire de l'artère vestibulo-cochléaire

- Artère cochléaire propre
- Branche cochléaire de l'artère vestibulo-cochléaire
- Branche vestibulaire de l'artère vestibulo-cochléaire
- Artère vestibulaire antérieure

La vascularisation veineuse est assurée par la veine labyrinthique, la veine de l'aqueduc cochléaire et la veine de l'aqueduc vestibulaire.

Elles vont se drainer par les sinus pétreux qui vont s'aboucher dans la veine jugulaire interne, laquelle va sortir du basicrâne par le foramen jugulaire.

B- ANATOMIE PEDIATRIQUE

La particularité de l'oreille interne chez l'enfant est que, pour l'essentiel, elle a la morphologie et la taille de celle de l'adulte (Veillon). Seules diffèrent les composantes de l'OI liée à la croissance du rocher et l'état d'ossification qui sont progressifs avec l'âge.

Ainsi, pour le rocher, sa croissance continue jusqu'à l'adolescence (Virapongse).

Quant à l'ossification, plusieurs études décrivent son caractère incomplet chez l'enfant. Il est souvent décrit dans la population pédiatrique, des petites hypodensités tomodynamométriques péricochléaires.

Dans une étude tomodynamométrique sur 73 enfants de 0 à 9 ans (Pekkola 2004), il a été retrouvé une hypodensité bilatérale dans la région de la fissula ante fenestram dans 32 % des cas (et jusqu'à 1 cas sur 2 chez les moins de 3 ans). Cette petite hypodensité se situe en avant de la fenêtre ovale et est linéaire, parallèle à la courbe de la cochlée dans un plan coronal. Elle est retrouvée dans différentes situations cliniques et est considérée par les auteurs comme une variante de la normale, l'otospongiose étant très rare chez l'enfant.

Moser et al (Moser 2008) dans une étude à la fois histopathologique (sur 3 fœtus de 8 mois) et tomodynamométrique a décrit une hypodensité focale de l'apex pétreux. Cette image a été détaillée sur les scanners de 66 crânes dont 19 fœtus (de 7,7 mois en moyenne), 24 nouveaux-nés (5 mois en moyenne) et 23 jeunes enfants (24 mois en moyenne). Il a observé cette hypodensité à la partie antérieure de la capsule uniquement chez des fœtus et des enfants de moins de 4 ans. Cette zone hypodense, lorsque présente, reliait la couche moyenne de la capsule à la fissure pétro-occipitale (alors que l'apex pétreux n'est pas encore développé) et était systématiquement associée à d'autres hypodensités de la capsule moyenne. L'auteur constate histologiquement que cette zone correspond à une rupture de la couche externe avec l'observation d'une invagination de couche moyenne constituée d'os trabéculaire entouré de cartilage.

Chadwell (Chadwell 2004) a étudié en TDM 100 enfants (200 rochers) de 0,5 à 19,3 ans. Il a constaté l'existence d'une fente ou sillon cochléaire chez 41% d'entre eux (34% des rochers) décroissant avec l'âge avec incidence de 62% chez l'enfant de moins de 4 ans et de 19% entre 10 et 19,3 ans. Il décrit cette fente comme linéaire, parallèle au tour basal de la cochlée, proche de la fissula ante fenestram et située dans la partie moyenne de la capsule otique. Il la rattache à une ossification incomplète de la couche enchondrale et en fait un état transitoire chez l'enfant en attendant l'ossification complète.

Les causes d'hypodensité tomodynamométrique de la capsule otique peuvent être un résidu embryonnaire, une ostéogenèse imparfaite, une otospongiose et le Paget (Chadwell 2004, Moser 2008). Les résidus embryonnaires de la couche moyenne de la capsule otique sont fréquents chez l'enfant (souvent dans la région de la fissula ante fenestram) et ils sont généralement attribués à des résidus de cartilage, à du fibrocartilage, à de l'os non

minéralisé ou à de la moelle osseuse (Moser 2008).

C- RADIOANATOMIE

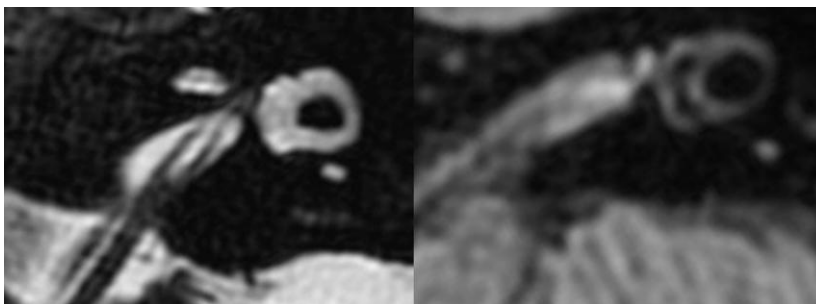
Radiographies et tomographies : Elles ont été longtemps les seuls examens disponibles. Si elles ont été le substrat de nombreuses études, l'apparition de la tomodensitométrie les a rendu obsolètes et l'anatomie radiologique a dû être de nouveau décrite.

Les modalités d'imagerie modernes pour étudier l'anatomie sont constituées de la tomodensitométrie et de l'IRM. Ces techniques sont complémentaires (Lemmerling) avec la tomodensitométrie plus adaptée à l'étude de l'os et l'IRM très performante pour le contraste des tissus mous et les liquides.

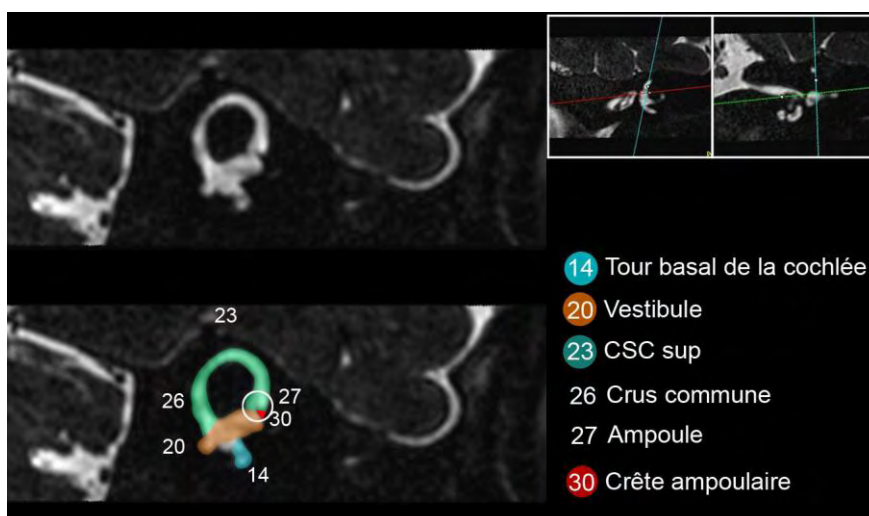
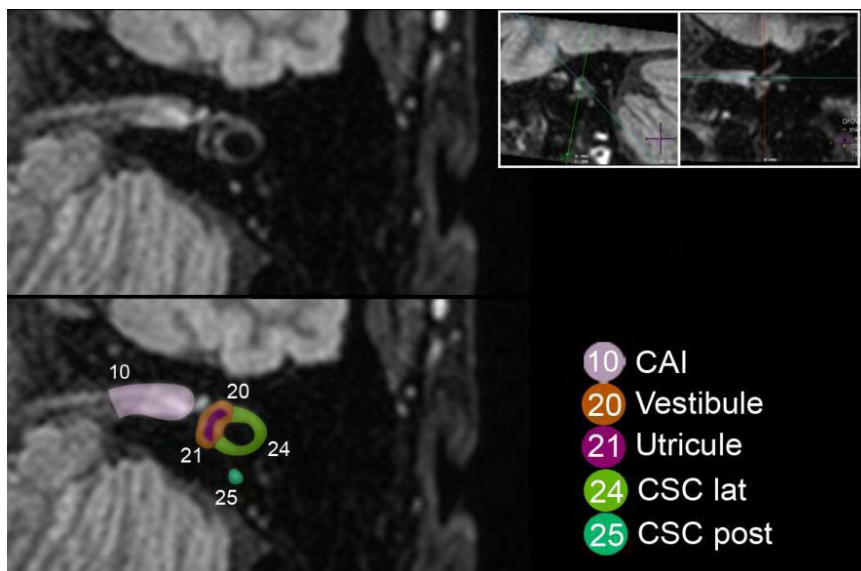
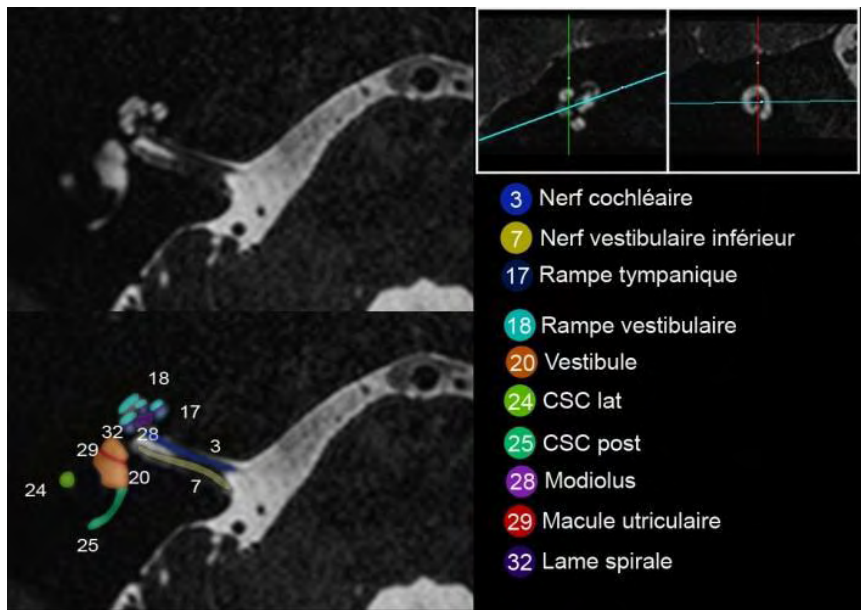
Mais ces techniques ont connu des évolutions technologiques constantes et significatives ayant permis à la fois d'améliorer leur facilité d'utilisation et leur résolution spatiale (résolution infra-millimétrique). Ainsi, la tomodensitométrie est passée d'une acquisition en monobarettes au mode multibarettes (16, 64, 256). De même, l'IRM est passée en pratique clinique d'équipements de 1 tesla à 1.5T puis à 3 T. Des machines de recherche existent en 7 T.

Si les IRM 1.5T permettait de très bien visualiser les liquides (LCR et labyrinthiques), elle ne permettait pas de les discriminer. L'IRM 3T permet de distinguer certaines structures endolymphatiques comme le saccule et l'utricule. Cela a un intérêt dans des études volumétriques (par exemple dans la maladie de Ménière). Elle permet même de discriminer les espaces liquidiens sus et sous-jacents de la lame spirale.

Ainsi, sur l'image suivante, l'IRM 1.5T (à gauche) ne permet pas de distinguer l'utricule, bien visible en 3 T (à droite) :



Radioanatomie IRM en 3T, d'après E. Banciu (CHU de Grenoble) :



III ONTOGENESE, PHYLOGENESE

L'anthropologie est assimilée à l'histoire naturelle de l'homme et, de ce fait, étudie la spécificité et la diversité humaine, des origines de la lignée à nos jours (Crubézy). L'anthropobiologie étudie la diversité biologique de l'homme tout au long de sa lignée.

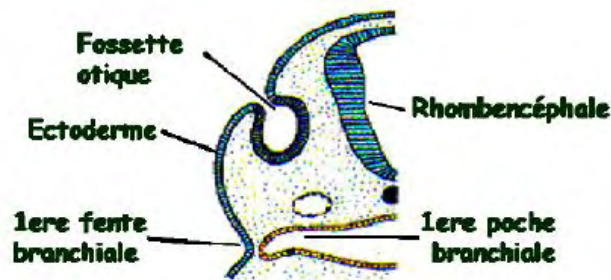
2 particularités de l'OI en font une ressource intéressante dans les études anthropologiques et plus largement dans les études animales :

- le caractère dense de l'os temporal qui lui permet de résister aux processus taphonomiques
- l'atteinte de la taille adulte avant la naissance qui donne des indications phylogénétiques, indépendantes de l'environnement, et relatives à la locomotion

Embryologie de l'OI chez l'humain

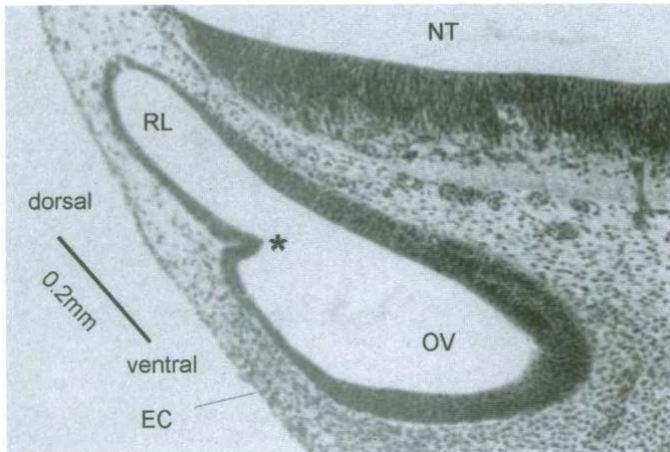
Le labyrinthe membraneux se développe à partir d'épithélium :

- 1) La placode otique, épaissement de l'ectoderme, apparaît au 22^e jour (au niveau du cerveau postérieur en arrière du 1^{er} arc branchial).
- 2) Elle s'invagine ensuite dans le mésenchyme sous-jacent pour donner la fossette otique.



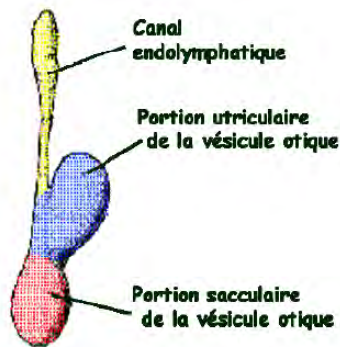
D'après Pr Manuel Marck, 2007

- 3) Cette invagination se referme et s'isole de l'ectoderme au 26^e jour donnant la vésicule otique.

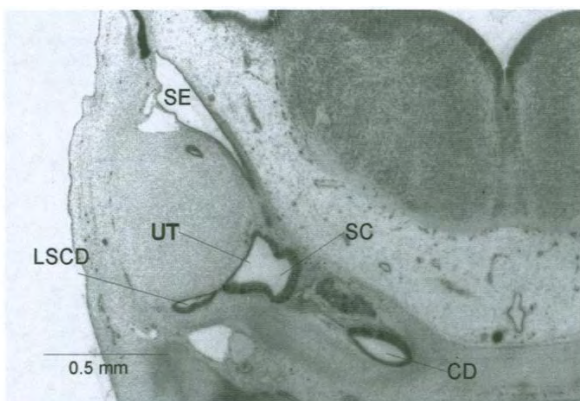


D'après Arnold : OV= vésicule otique ; RL= récessus labyrinthique ; EC= ectoderme superficiel ; *=repli épithélial

4) La vésicule va se dédoubler en ganglion vestibulo-cochléaire et en ébauche du labyrinthe membraneux. Celui-ci se présente sous forme de 3 composantes : Le canal endolymphatique (qui va donner le sac), l'utricule (qui va donner 3 diverticules qui seront les CSC et déjà formés au 47^e jour), le saccule (qui va donner naissance au canal cochléaire qui va croître en s'enroulant).



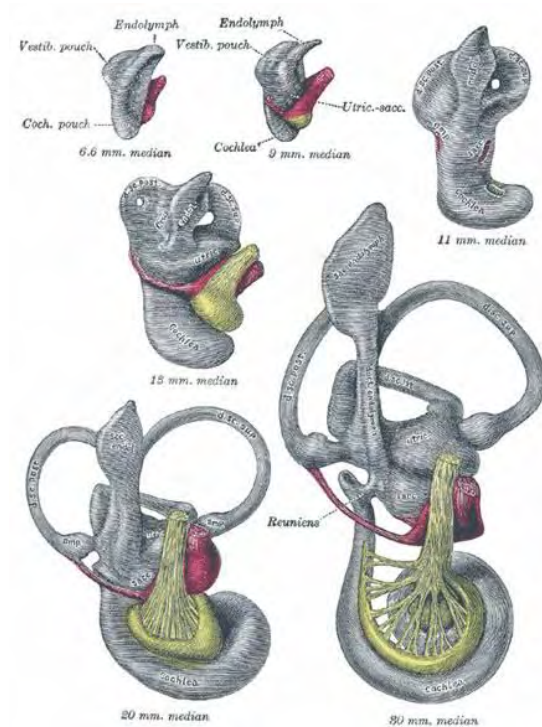
D'après Pr Manuel Marck, 2007



D'après Arnold : SC= saccule; UT=utricule ; LSCD= LSC duct ; CD= cochlear duct ; SE= sac

endolymphatique.

5) Une partie de l'épithélium du labyrinthe membraneux va se différencier en cellules neurosensorielles ciliées : macules de l'utricule et du saccule, crêtes ampullaires des CSC, organe de Corti du canal cochléaire.



D'après « Gray's Anatomy », Ed Elsevier

Le labyrinthe osseux se développe, lui, à partir du mésenchyme :

A 8-9 SA, le mésenchyme entourant la vésicule otique va se condenser et se différencier en cellules cartilagineuses. Puis, vont se former les capsules otiques cartilagineuses, responsables de renflements latéraux du chondrocrâne, qui vont subir une ossification endochondrale. Le développement de la capsule otique est induit par la vésicule otique (Arnold). Chaque capsule otique est divisée en partie antérieure cochléaire et la partie postérieure canaliculaire. Cette dernière va donner forme à la fossa subarcuata, au foramen endolymphatique et aux éminences des CSC. Le CSCL est le dernier à se développer et plus lentement que les autres. La partie cochléaire va former un large méat auditif interne. Tout en se développant, la capsule otique cartilagineuse va laisser passage aux conduits périlymphatiques.

Ce développement embryologique de la capsule otique, qui se développe autour du labyrinthe membraneux à partir d'une ossification progressive du cartilage (Declau), est unique dans le squelette humain. Cette ossification va se former en 3 couches : interne

(endoste), moyenne (contenant des éléments enchondraux et intrachondriaux) et externe (périoste). Contrairement aux os longs, cette trame cartilagineuse croît extrêmement rapidement pour atteindre la taille adulte vers 5 mois de l'âge fœtal. Une fois cette taille adulte atteinte, l'ossification commence au niveau de 14 centres différents (Moser 2008). L'ossification débute autour de la cochlée et du vestibule et se termine autour des CSC. La couche moyenne tarde souvent à s'ossifier et peut comporter des éléments cartilagineux au-delà de la naissance. Les régions de la fissula ante fenestram et de la fenêtre ovale sont les dernières à s'ossifier. La structure de la couche moyenne est exceptionnelle dans le squelette humain par sa composition de cartilage hyalin calcifié avec des lacunes contenant du vrai os entouré d'os enchondral primitif.

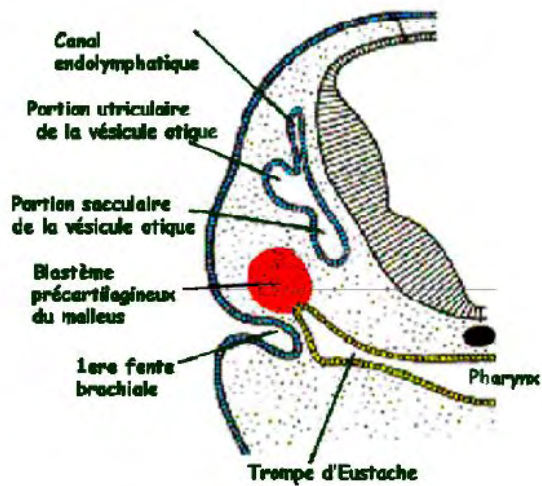
Michaels et al. (2010), dans une étude histologique extensive (108 os temporaux de 8 SA à 54 ans), ont décrit une mince couche cartilagineuse microcanaulaire persistante dans la couche interne autour de l'aqueduc vestibulaire. Ils émettent l'hypothèse que cette couche joue un rôle actif dans la constitution chimique du liquide endolymphatique.

Quant à la minéralisation osseuse, selon Richard et al. (Richard 2010), l'enveloppe de la cochlée s'ossifie à 23 SA, avec une accélération de 24 à 26 SA et une autre après 31 SA. Le CSCA, qui s'ossifie à 23 SA, est le premier à atteindre la taille adulte (7-8 mm). Il est suivi du CSCP à 24 SA et du CSCL à 25 SA. La capsule otique se minéralise selon un modèle enchondral à partir de 6 SA, tandis qu'un modèle membraneux est décrit au niveau du modiolus, le mur du CSCL et l'ostium externe de l'aqueduc du vestibule. La minéralisation de la cochlée continue après la naissance avec une densité du tour basale supérieure à celle de l'apex à 39 SA, c'est également le cas de la fissula ante fenestram.

Embryologie de l'oreille moyenne et de l'oreille externe

L'oreille moyenne se développe à partir de l'endoderme :

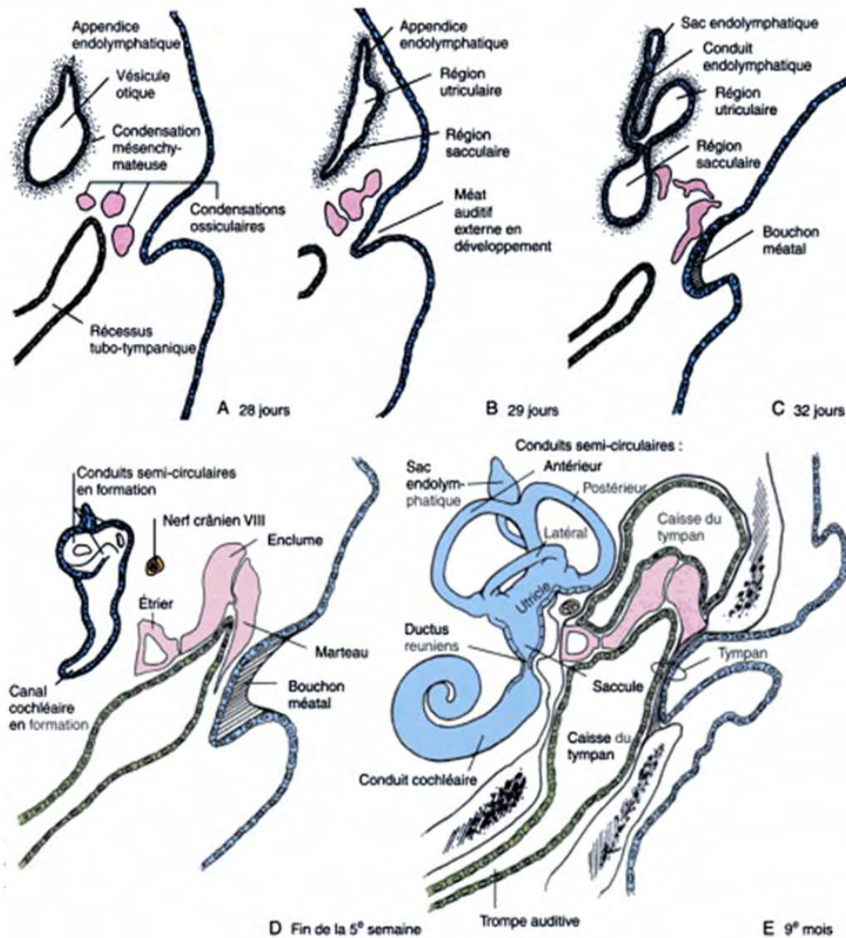
Le récessus tubotympanique, dérivé du pharynx primitif, va donner la cavité tympanique et le canal auditif (trompe d'Eustache) vers 4-5 SA. L'extrémité du canal auditif va se dilater, donnant naissance à la caisse du tympan qui va englober les ébauches cartilagineuses des 3 osselets. Ceux-ci proviennent du mésenchyme situé entre le canal auditif et la première fente brachiale (marteau et enclume du 1^{er} arc pharyngien, étrier du 2^{ème} arc). Les osselets se développent à partir de 4-6 semaines de vie intra-utérine tandis que leur ossification est déjà effective à 22 semaines (Yokoyama). Cette ossification est progressive et continue après la naissance. La moelle osseuse dans l'enclume et la tête du marteau n'est plus visible à l'âge de 4 ans.



D'après Pr Manuel Marck, 2007

L'oreille externe, elle, se développe à partir de l'ectoderme et du mésenchyme sous-jacent :

La première fente pharyngée va former le méat auditif externe en s'étendant médialement vers le récessus tubotympanique. 6 bourgeons auriculaires, originaires des 2 premiers arcs branchiaux, se développent autour de la première fente branchiale pour former le pavillon de l'oreille. La membrane tympanique est constituée de 3 couches : l'ectoderme (qui vient de la fente pharyngée), l'endoderme (qui vient du canal auditif) et du mésoderme (qui s'est aminci entre les 2). L'anneau tympanique (ou tympanic ring) supporte la membrane. Oblique à la naissance, il va continuer à se développer jusqu'à la puberté, suivant la croissance de la mastoïde (Bowden).



D'après William Larsen, développement de l'oreille

Os pétreux

S'il existe un lien certain entre le développement de la vésicule otique et de la capsule otique, l'influence sur l'os pétreux est moindre car celui-ci continue à se développer après la naissance. Leurs origines sont différentes, avec l'OI qui dérive de l'ectoderme tandis que le rocher dérive de cellules de la crête neurale (Arnold). Celles-ci font l'objet de migrations, en rapport avec des interactions liées au développement du cerveau et d'autres structures nerveuses.

L'os pétreux fait partie de la base du crâne qui est préformée de cartilage se condensant dès la 4^e semaine de gestation intra-utérine (Ricciardelli). Elle s'ossifie, selon les os, de façon endochondrale ou intramembraneuse. Les os faciaux et la calvaria sont, eux, d'origine membraneuse (Nemzek 2000).

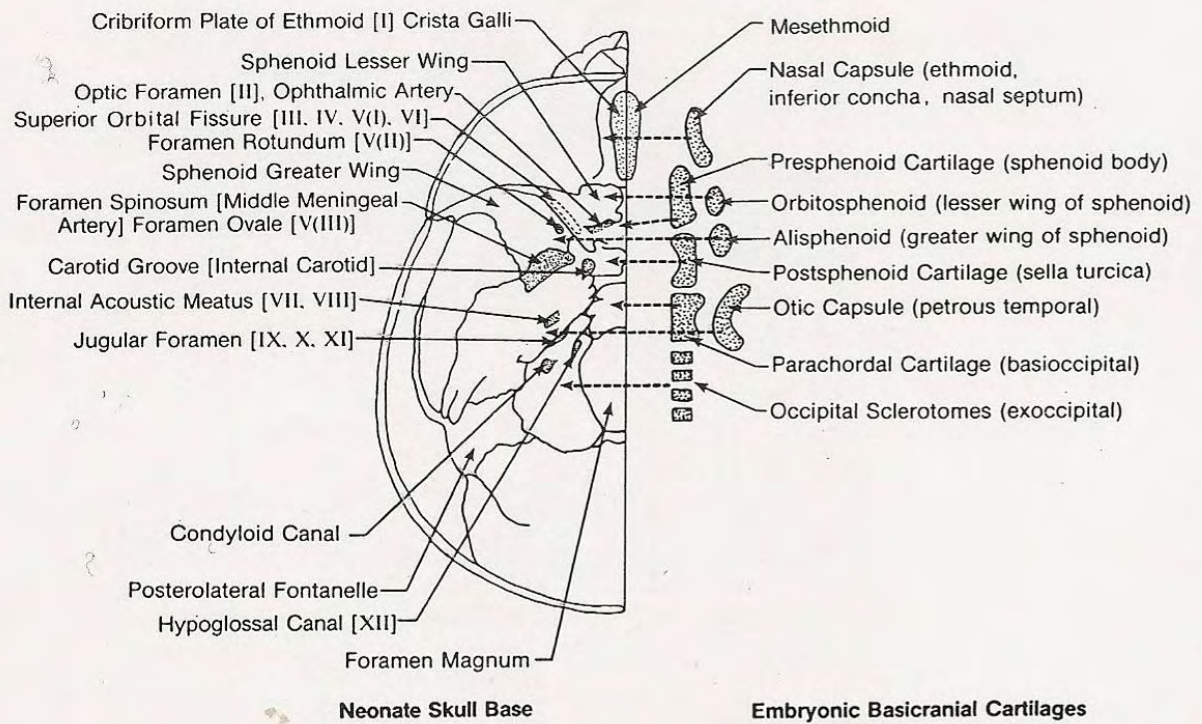


Figure 1. Neonatal chondrocranium and embryonic basal cartilages. (From Sperber GH: The cranial base. In Craniofacial Embryology. London, Butterworths, 1989, p 102; with permission.)

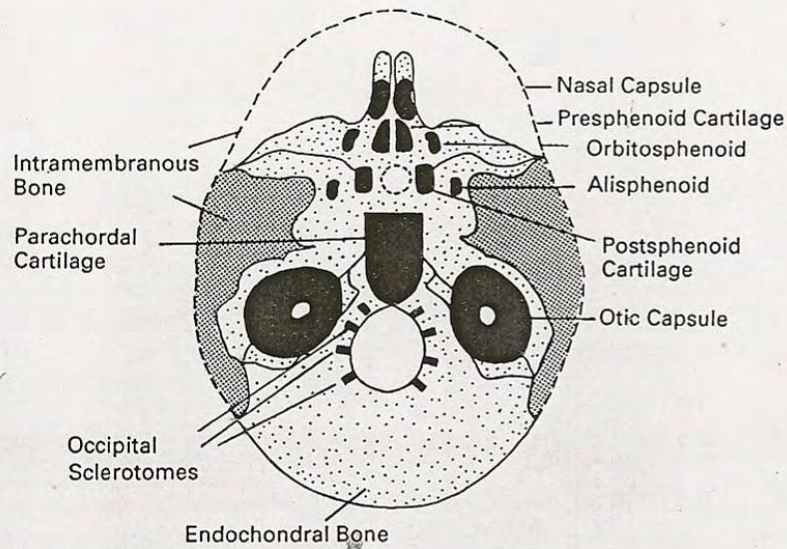


Figure 2. Skull base derivation from intramembranous (*heavy stipple*) and endochondral (*light stipple*) bone. Black areas represent embryonic basal cartilages. (From Sperber GH: The cranial base. In Craniofacial Embryology. London, Butterworths, 1989, p 115; with permission.)

D'après Ricciardelli : Ossification de la base du crâne

Phylogenèse

Spoor et Zonneveld (1998) relèvent le grand intérêt du labyrinthe osseux dans les études phylogénétiques dans la mesure où c'est un résidu bien préservé dans les fossiles. Les premières observations comparatives datent de 1845 par l'anatomiste Viennois Joseph Hyrtl.

L'ébauche de l'oreille est apparue chez le poisson comme un système de détection du déplacement de l'eau. Les CSC et l'utricule sont plus anciens que le saccule et le canal cochléaire (Swartz 1996b). Le passage des organismes de l'environnement aquatique à la vie terrestre aurait conduit à l'invagination de la ligne latérale et au développement de l'audition. L'appareil ossiculaire s'est développé pour assurer un moyen de conduction en l'absence d'eau de mer (Swartz 1996b). D'autres auteurs envisagent une origine commune mais indépendante de l'OI et de la ligne latérale à partir de neuromastes superficiels (Carey).

L'oreille interne des mammifères est complexe et comprend plusieurs éléments communs : 3 CSC jouant le rôle de récepteurs détectant l'accélération angulaire de la tête et aidant à la stabilisation de la tête et des yeux via les réflexes vestibulo-oculaire et vestibulo-colique. Les réflexes vestibulo-spinaux contribuent à la coordination des mouvements corporels (Spoor 1998). 2 organes otholitiques (saccule et utricule) détectent les accélérations linéaires du corps et les inclinaisons de la tête par rapport au plan de la gravité (Kirk 2009). Il faut noter le haut degré d'intégration entre données vestibulaires, visuelles et proprioceptives.

Dans une large étude comparative, Spoor et Zonneveld (1998) ont étudié par scannographie 42 espèces de primates dont des humains (total de 296 spécimens). Si le rayon du CSCA est supérieur chez l'humain à celui des grands singes, le CSCL est plus petit tandis que le CSCP est égal à celui du gorille. Ils constatent une corrélation positive entre l'arc des CSC et le poids des espèces. Le rayon des CSC est plus grand chez les espèces les plus agiles et chez celles dotées de plus de mobilité céphalique. Ceci serait valable plus largement dans l'ère animale, à l'exception des cétacés (dont la mobilité du cou et des yeux est très limitée). En fait 2 éléments entrent en compte, le diamètre du canal (même si ce n'est qu'une approximation du labyrinthe membraneux) qui témoigne de la réactivité, et le rayon qui témoigne de la sensibilité du système vestibulaire. Toutefois il persiste des incohérences entre le modèle théorique et les preuves comparatives, témoignant de connaissances encore manquantes. Spoor et Zonneveld notent aussi que l'angle entre les 2 CSC verticaux est remarquablement constant (autour de 100°) chez les anthropoïdes et que le tour basal de la cochlée est plus large chez l'humain.

Spoor (1998) ajoute que l'OI de l'humain est différente de celle des primates :

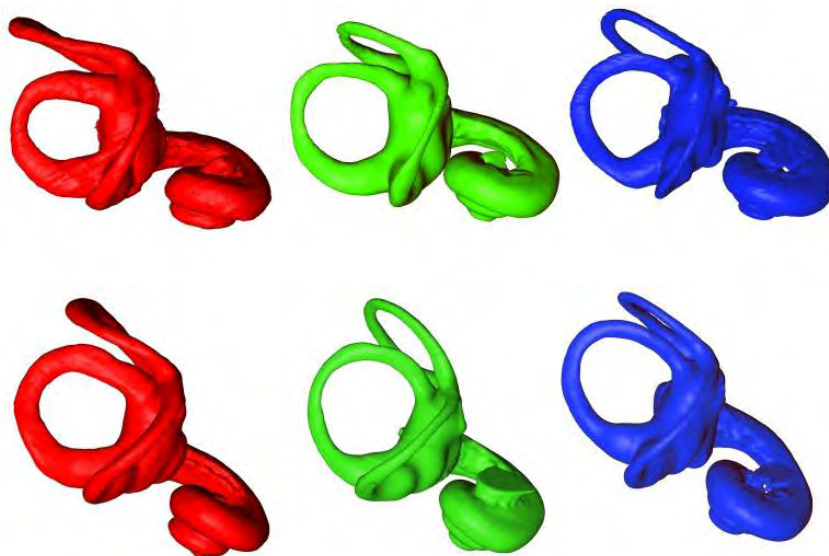
- Par la taille (diamètre et arc des CSC verticaux), en rapport avec la locomotion bipédale
- un espace périlymphatique important

- une orientation plus coronale des rochers liée à l'expansion latérale du cervelet dont le développement est contrainte par une courte base postérieure du crâne.

Le labyrinthe osseux (notamment la taille et l'orientation des CSC) a été utilisé dans des études comparatives du comportement locomoteur par d'autres auteurs (Kirk 2009). Il a également été utilisé pour différencier les espèces en fonction de leur capacité auditive. Kik et al (Kirk 2009) ont ainsi étudié l'audition chez les cétacés fossiles, les australopithèques, les archosaures fossiles et les amniotes non mammifères.

Dans une large revue d'anatomie comparative chez les mammifères, Ekdale (2013) retrouve la corrélation entre poids du corps et volume et longueur de l'OI. Il ne constate pas cette corrélation pour l'extension du coiling de la cochlée. Il observe que le CSCA est le plus large dans la majorité des espèces, ce qu'il attribue à la plus grande sensibilité aux mouvements de la tête dans la direction antéro-postérieure. Le CSCP est le moins planaire tandis que le CSCL est le plus planaire. Par ailleurs, il note que la contribution vestibulaire est plus importante chez les mammifères terrestres que chez les aquatiques. Enfin, Ekdale conclue que, face à la variabilité des formes anatomiques, étaient responsables à la fois des facteurs physiologiques et phylogéniques.

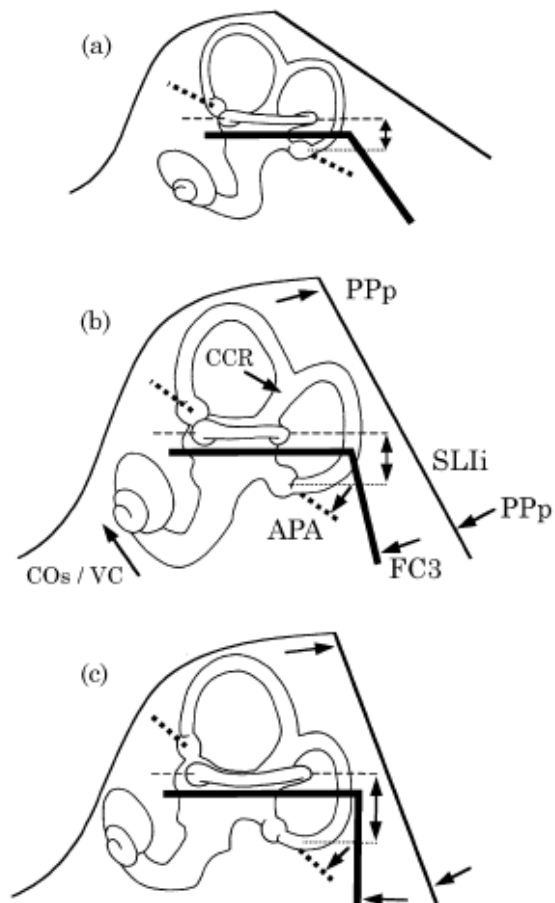
El Khoury (2014) a comparé l'OI de l'humain, du chimpanzé (*pan paniscus*) et du bonobo (*pan troglodytes*). La séparation entre humains et grands singes datant de 7-8 millions d'années tandis que la séparation entre chimpanzés et bonobos de 1.5-2.1 millions. Alors que le chimpanzé et l'humain sont censés être génétiquement plus proches, cette étude montre au contraire de plus grandes similarités entre l'humain et le bonobo (angles entre CSC, angles entre CSC et plans du crâne). Il existe même un chevauchement de données entre singes et humains comme en témoigne l'aspect morphologique très proche.



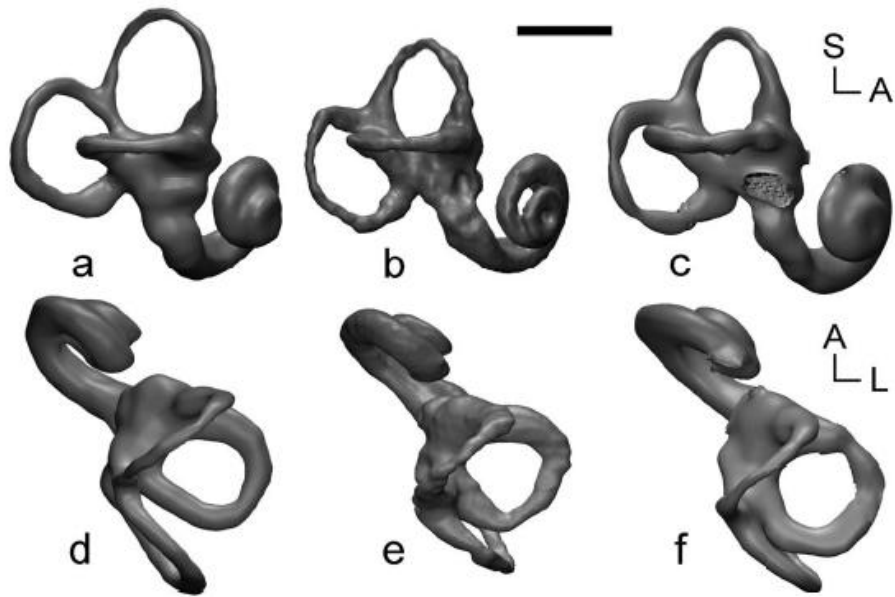
D'après El Khoury : Segmentation obtenue en micro-TDM ; humains en rouge, *Pan paniscus* en vert et *Pan troglodytes* en bleu.

Spoor et Zonneveld (1995) ont été parmi les premiers à utiliser la TDM pour étudier la morphométrie du labyrinthe osseux chez des primates (humains, macaques).

Parmi les hominidés, des différences morphologiques existent. Spoor et al (2003) ont étudié 15 spécimens Néandertaliens, 4 humains modernes du haut Paléolithique, 2 humains modernes, 3 spécimens du Pléistocène intermédiaire et 54 humains de l'Holocène. Les Néandertaliens se caractérisent par une torsion du CSCA plus marquée, un CSCP en position basse, et un rayon plus grand du CSCL. Les auteurs rattachent ces particularités au mode locomoteur de cet hominidé, robuste mais avec des membres inférieurs plus courts. Malgré ces différences, et en raison de la variabilité des mesures, il existe un chevauchement important entre les aspects morphologiques des hominidés.



D'après Spoor (2003) : Vue latérale du labyrinthe osseux chez un Pan paniscus (a), humain Holocène (b) et un Néandertal (c).



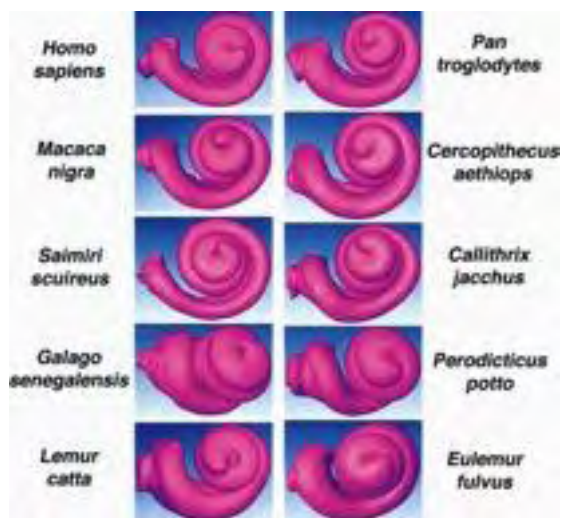
D'après Spoor (2003) : humain Holocène (a, d), Neanderthaliens (b,e) et (c, f)

Il faut néanmoins se garder de conclusions hâtives, étant donné l'importance des variations individuelles au sein d'une espèce, et du fait que des conclusions sont tirées à partir d'échantillons peu nombreux d'espèces éteintes (Welker).

Audition :

Kirk et al. (Kirk 2009) a étudié la relation entre volume de la cochlée (évaluée par micro-tomodensitométrie) et masse corporelle chez 33 espèces de primates. Il a également étudié la relation du volume cochléaire avec les capacités auditives chez 10 espèces de primates. Ils ont montré une corrélation positive significative entre volume de la cochlée et masse corporelle ainsi qu'une corrélation négative significative entre volume et limites des fréquences (plus la cochlée est volumineuse plus la limite de fréquence perçue est basse). Ceci est concordant avec la relation existant entre le volume cochléaire et la longueur de la membrane basilaire. Plus le volume de la cochlée augmente, plus la gamme des fréquences audibles diminue. Il est connu par ailleurs, que la limite des hautes fréquences est corrélée à la taille de la tête et du corps, en rapport avec une localisation efficace des sons. Ainsi, les mammifères avec une petite tête (donc un temps plus court pour transit du son) entendent des fréquences plus élevées que les mammifères avec des têtes larges.

Chez les mammifères, l'éléphant avec une membrane basilaire de 60 mm perçoit des fréquences auditives de 0,18 à 10,5 kHz alors que la souris, avec une membrane de 7 mm, perçoit de 2,7 à 79 kHz (West).



D'après Kirk, rendu 3D de 10 cochlées de primates

Equilibre

Berlin et al. (2013) ont comparé chez 39 espèces de mammifères (hors humain) l'angulation entre CSC homolatéraux, la symétrie entre CSC controlatéraux, la coplanarité entre CSC et la sensibilité du système vestibulaire à l'accélération angulaire. Ils ont constaté une capacité

céphalogyre moindre, pendant la locomotion, lorsque l'angle entre CSS homolatéraux s'éloignait de l'orthogonalité. La phylogénèse aurait une forte influence sur la relation entre coplanarité (des CSC synergistiques) et la sensibilité vestibulaire. La locomotion agissant à la fois sur le rayon et l'orientation des CSC (Berlin).

Malinzak et al. (2012) ont étudié le lien entre géométrie des CSC et la locomotion de 11 primates strepsirrhiniens (« lémurien ») avec des caractéristiques locomotrices très diverses. Ils ont trouvé un lien entre les animaux à forte vitesse de rotation de la tête et l'orthogonalité des CSC. Classiquement le rayon de courbure et la taille sont liés à la masse corporelle et à un index d'agilité (côté de 1 à 6).

Marugan-Lobon (2013) a étudié, par méthode procrustes, les hypothèses d'alignement du plan du CSCL. Les oiseaux ont un CSCL orienté globalement selon la posture d'alerte du crâne des animaux, les dinosaures le sont plutôt autour de la ligne d'horizon, tandis que l'alignement chez les humains ne répond à aucun des 2 axes précédents. Dans tous les cas, les écarts restent importants, indépendamment de la géométrie crânienne.

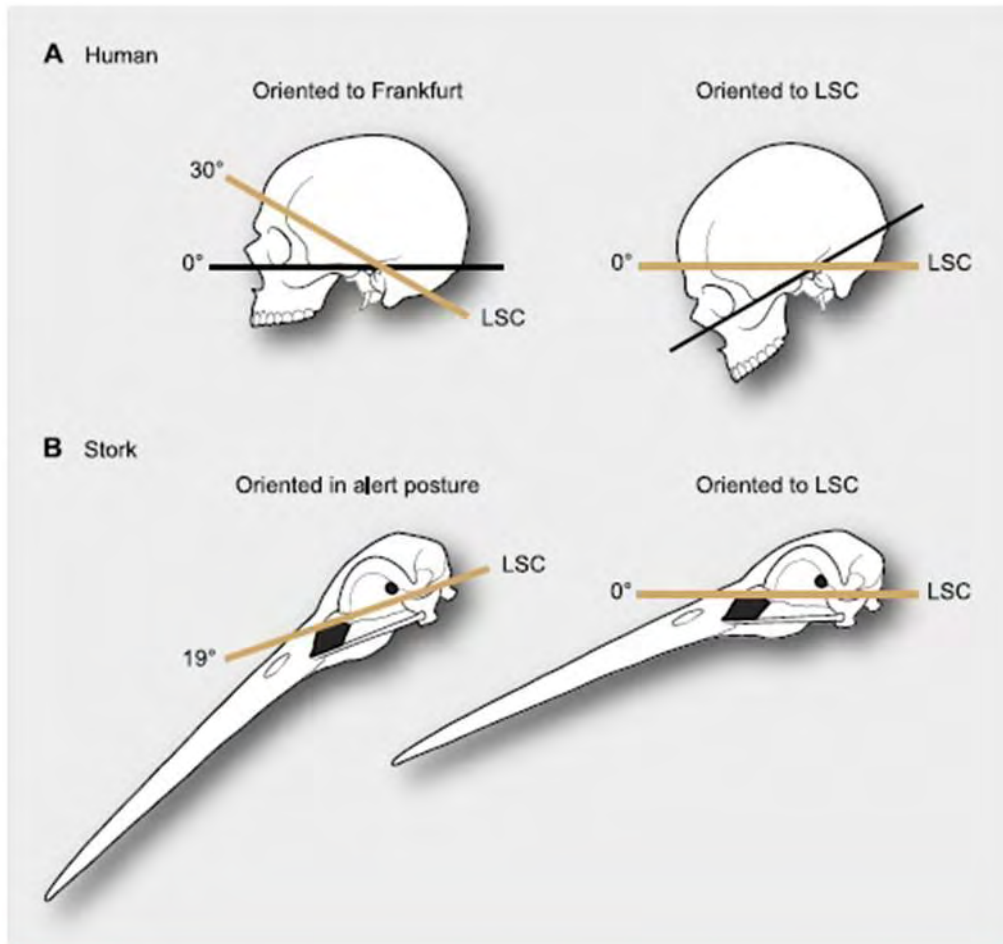
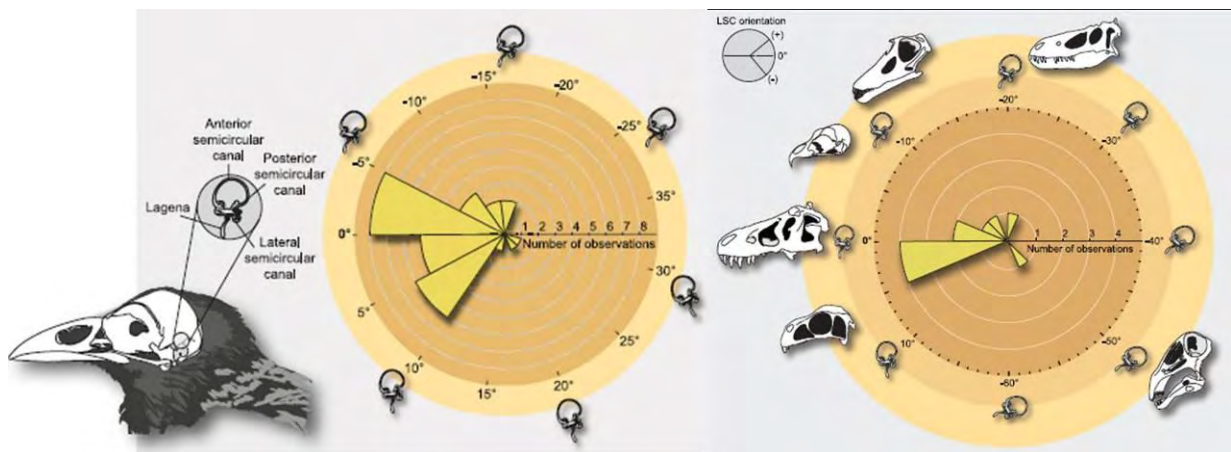


Figure 1 Differences in reference systems in skulls. (A) In the human skull there is a 30° difference between the Frankfurt plane and that of the LSC, thus yielding substantially different head orientations (from *de Beer, 1947*). (B) When a stork is in alert its LSC is oriented 19° above the horizon, thus when putting the LSC at 0° (horizontal) head posture differs from its alert posture (from *Duijm, 1951*).

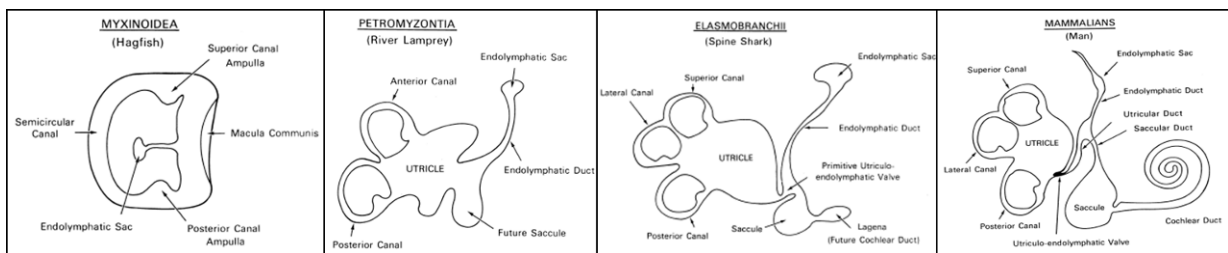


D'après Marugan-Lobon, répartition des observations d'alignement du CSCL chez les oiseaux (à gauche) et les dinosaures (à droite).

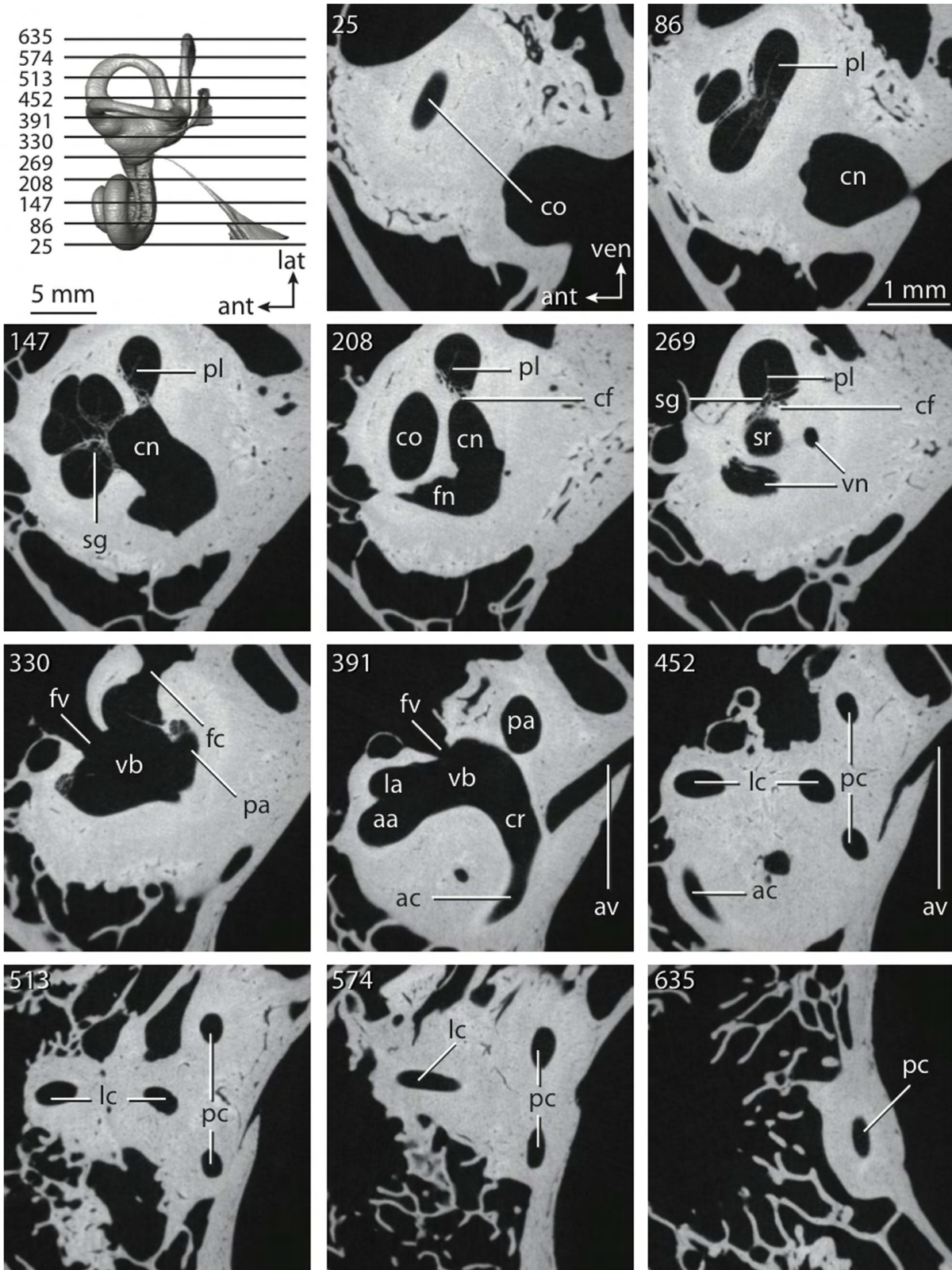
Carey et Amin (2006), dans une revue, rappellent les liens entre équilibre et audition,

lesquels sur des stéréocils. Ce sont des cellules mécanosensorielles qui contrôlent des canaux ioniques actionnant des neurotransmetteurs, puis les neurones afférents. Ce mécanisme est extrêmement fiable avec la détection de mouvements inférieurs au mouvement Brownien et des temps de latence de 10 μ sec. Ils rappellent que chez les vertébrés, il n'y a pas eu de séparation des organes de l'audition et de l'équilibre (qui restent dans la même capsule). Pour minimiser l'effet des variations de la pression ambiante (liée à l'audition) sur les organes d'équilibre, des propriétés physiques se sont développées (inélasticité du labyrinthe membraneux, capsule otique rigide, immersion dans périlymphe, aqueduc vestibulaire).

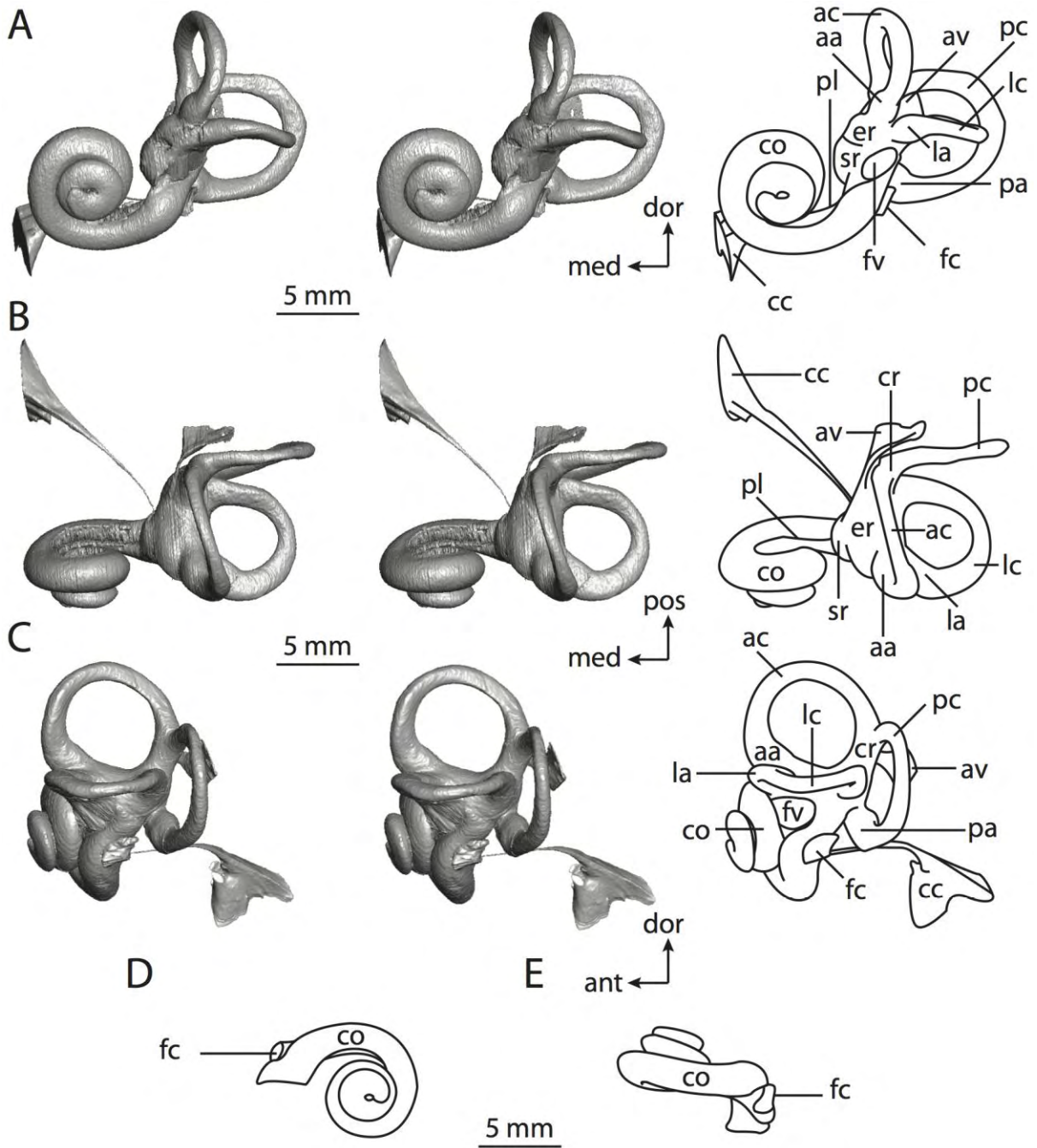
Enfin, Schulz-Mirbach (2013) a rappelé que, chez le poisson, l'OI comprenait 3 CSC et 3 organes otolithiques (sacule, macule et lagena), ces derniers pouvant servir à la fois pour l'audition et l'équilibration. Pour augmenter la fréquence détectée, jusqu'à plusieurs milliers de Hertz, des espèces ont développé des structures auditives accessoires : cavités gazeuses, cavités liquidiennes, chaîne ossiculaire ou ligamentaire.



D'après Gulya and Schuknecht: Aspects de l'OI de différentes espèces.



D'après Ekdale EG, micro-TDM de l'OI de Homo Sapiens (pc= posterior canal; lc= lateral canal; ac= anterior canal; av= aqueduc vestibulaire)

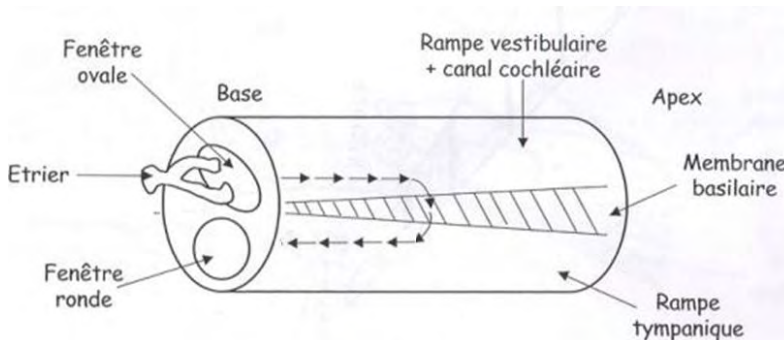


D'après Ekdale EG, labyrinthe osseux de l'Homme Sapiens (A=vue antérieure, B= vue postérieure, C= vue latérale, D= dessin cochléaire du coiling, E= dessin cochléaire de profil).

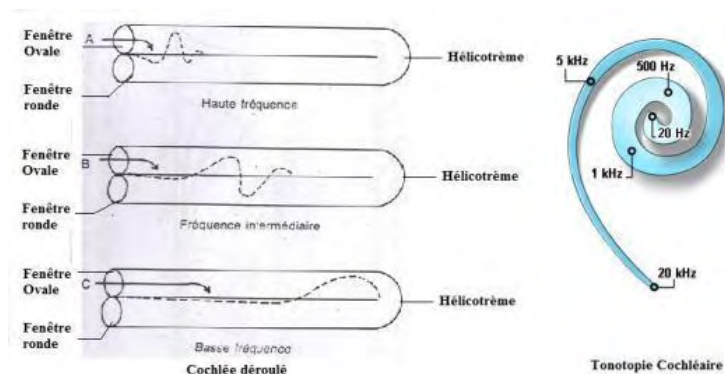
IV PHYSIOLOGIE ET PHYSIOPATHOLOGIE

Physiologie de l'audition

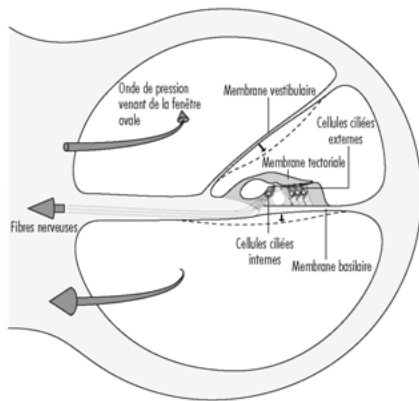
Le rôle de l'OI est la transformation du son aérien en signal électrique. Le pavillon de l'oreille a un rôle simple de captation et de concentration des ondes sonores vers le tympan. Le son aérien, au contact de la membrane tympanique est transformé en onde mécanique qui est amplifiée par la chaîne ossiculaire. Par le biais de la fenêtré ovale, obturée par la platine, l'onde mécanique se transforme en vague dans le liquide cochléaire jusqu'à l'apex. Ces vagues se propagent sur la membrane basilaire selon la fréquence du son. Les basses fréquences se propageant plus loin (sommet de la cochlée) que les hautes. Puis cette vague revient à la fenêtré ronde par la rampe vestibulaire, les 2 fenêtrés agissant en miroir (cf schéma suivant). L'organe de Corti, en charge de la transduction mécano-électrique, va transformer la vague liquidienne en impulsions électriques. Les stéréocils sont étirés par la vague liquidienne ce qui ouvre des canaux cationiques (mécano-sensibles) permettant l'entrée de K^+ et de Ca^{2+} . Il existe un potentiel électrique entre les stéréocils qui baignent dans l'endolymphe, et le corps des cellules ciliées qui sont dans la périlymphe. L'endolymphe est riche en potassium tandis que la périlymphe l'est en sodium. L'entrée de cations dépoliarise la cellule ciliée. Dans chaque oreille, 30000 fibres nerveuses collectent ce signal électrique jusqu'au nerf cochléaire qui va remonter l'information au cerveau.



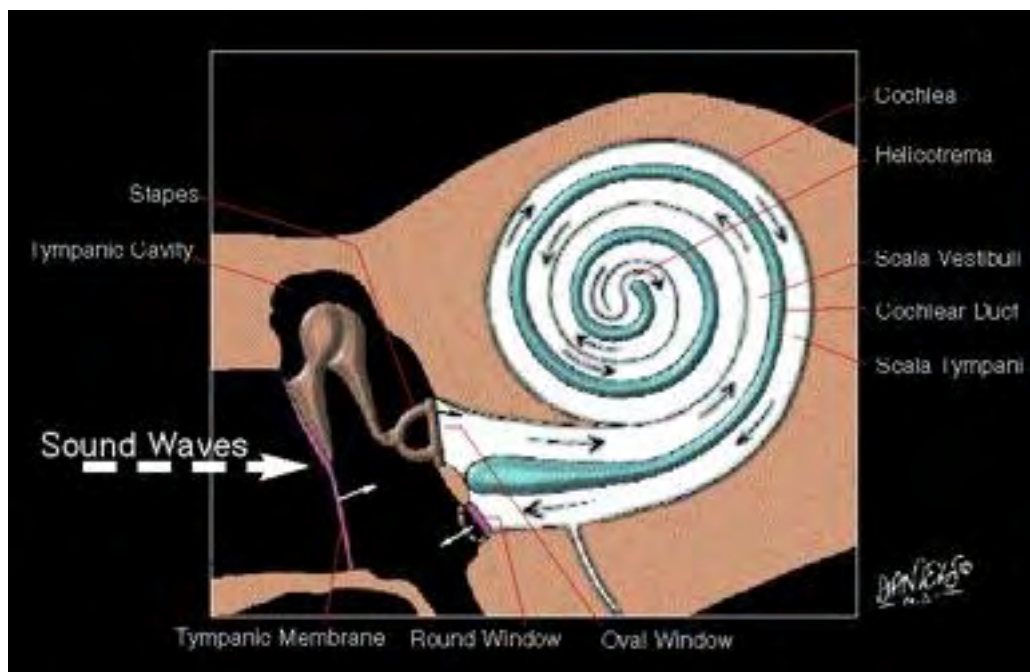
D'après <http://symphoniescientifique-tpe.e-monsite.com/pages/page-1.html>



D'après tpe-son-jvc.e-monsite.com



D'après Hohmann et Schmuckli, Dangers du bruit pour l'ouïe à l'emplacement de travail, Lucerne, 1989.



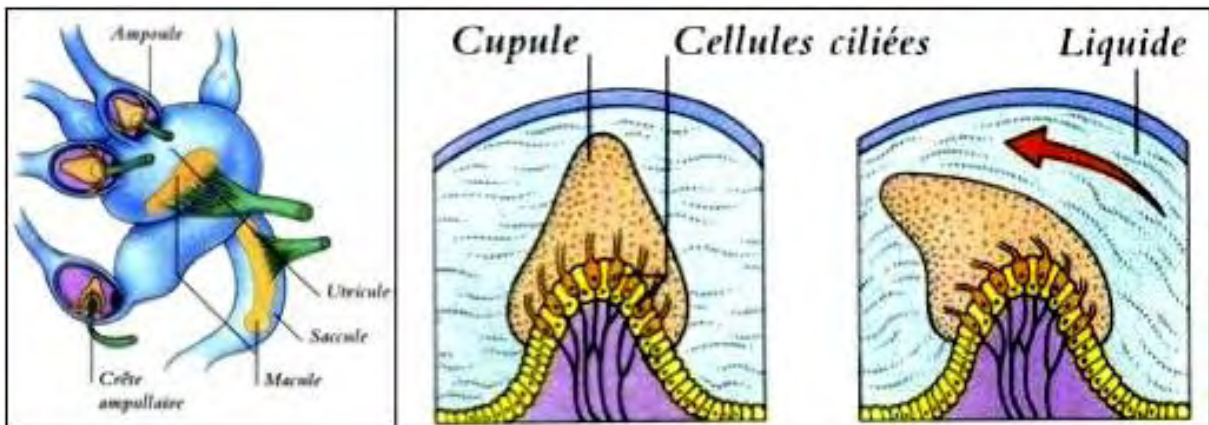
D'après Daniels (1996)

Physiologie de la participation de l'OI dans l'équilibre

L'OI est un des acteurs de l'équilibre avec les systèmes visuel et proprioceptif.

Le liquide endolymphatique du système vestibulaire est déplacé par les déplacements de la tête (linéaire et angulaire). Ce déplacement liquidien ébranle la substance gélatineuse dans laquelle sont pris les cils des récepteurs. Ceux-ci sont situés dans la macule des organes otolithiques et la crête de l'ampoule des CSC. Ces récepteurs transmettent l'information nerveuse qui permet un ajustement réflexe de posture et de locomotion. Les différents récepteurs sont spécialisés en fonction des mouvements : Macule sacculaire pour l'accélération linéaire verticale, macule utriculaire pour l'accélération linéaire horizontale,

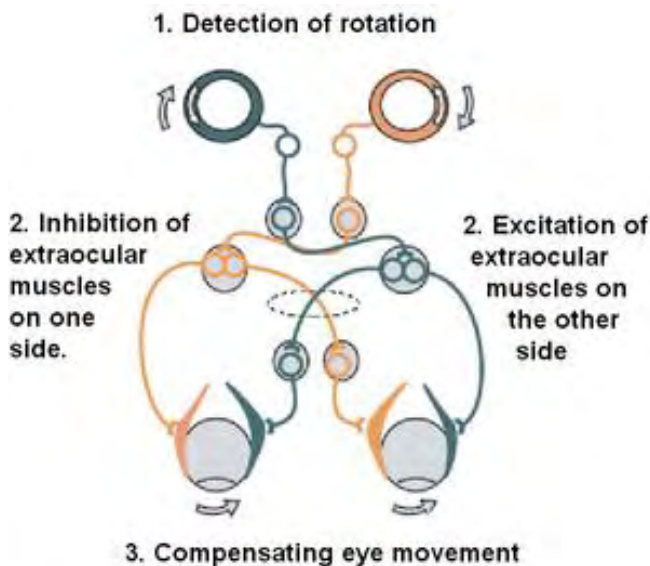
les CSC pour l'accélération angulaire (d'où leur disposition grossièrement orthogonale).



Les macules sont perpendiculaires entre elles (utriculaire horizontale, sacculaire verticale), ainsi que les crêtes ampullaires, permettant de prendre en compte tous les mouvements possibles de la tête dans l'espace.

Le vestibule interagit avec les autres acteurs de l'équilibre :

- Le réflexe oculo-vestibulaire (ou ROV) permet la stabilité oculaire lors des mouvements de la tête. Il est permis par l'action conjointe des CSC qui perçoivent les accélérations angulaires de la tête et les muscles oculo-moteurs qui produisent les mouvements compensatoires (cf figure suivante).



Les positions géométriques respectives des CSC et des muscles oculo-moteurs ont généré une littérature abondante ; en effet, l'hypothèse selon laquelle les plans des structures synergistiques étaient alignés (e.g. CSCP gauche et muscle droit latéral à droite) était séduisante. Cox et Jeffery (2008) ont étudié cela chez 53 mammifères adultes de 7 espèces

(dont l'humain). Ils constatent que ces structures sont rarement parfaitement alignées (avec des différences nettes d'alignement chez l'humain en faisant un groupe à part). De plus, si la variation d'angulation entre CSC (autour de l'orthogonalité) est limitée (de 32° à 41°), elle est plus importante entre plans musculaires et CSC (jusqu'à 62°). Ces différences peuvent être dues à l'effet de la croissance de l'œil qui, contrairement à l'OI, continue après la naissance. De plus, la taille de l'œil n'a pas une relation linéaire avec la taille corporelle. Ils concluent que ces différences d'alignement sont compensées probablement par l'arc tri-neuronal impliquant la transformation du signal au niveau des noyaux vestibulaires. Ils évoquent d'autres possibilités de compensation comme la torsion des CSC ou la common crus.

- Les réflexes vestibulo-spinaux :

Ils agissent par le biais de motoneurones contrôlant les muscles du tronc, du rachis et des membres. On les différencie classiquement en réflexes statiques (en réponse à la posture) et stato-kinétiques (en réponse à un mouvement).

Pathologie

Surdité :

1 enfant sur 1000 souffre de perte auditive sévère (> 50 dB) détectable dans la première année, dont l'origine est congénitale dans 90% des cas. 1 enfant supplémentaire sur 1000 souffre d'une surdité modérée à sévère, généralement pas découverte avant 3 ans (Phillips). On note une prédominance masculine mais qui est mal expliquée (Bamiou).

Dans le premier cas, un scanner est préconisé à la période néonatale, âge auquel la réalisation d'un scanner ne nécessite pas de sédation. Si la surdité est détectée plus tard, une TDM doit aussi être réalisée, au besoin sous anesthésie générale.

Dans les désordres héréditaires, ce sont généralement des anomalies cochléaires qui sont observées. Dès 1990, Pappas décrit des anomalies tomodensitométriques associées aux surdités neurosensorielles (SNS). Plusieurs groupes de maladies sont responsables de malformations de l'oreille moyenne :

- Le groupe des syndromes otocrâniofaciaux : microsomie crâniofaciale (Goldenhar), dysostose mandibulofaciale (Treacher Collins), syndrome de Pierre Robin, dysostoses crâniofaciales (Apert, Pfeiffer, Saethre-Chotzen, Crouzon), Cryophthalmos, Waardenburg et syndrome branchio-otorenal (Phillips).
- Le groupe des anomalies avec des anomalies cervicales, comprenant le Klippel-Feil, le Wildervanck, la dysostose cléidocrâniale, le syndrome otocervical et la déformation de Sprengel.
- Les syndromes oto-squelettiques tels que l'ostéogénèse imparfaite, les dysplasies osseuses, maladie de Kniest, les syndromes otofacial digital (Mohr) et otopalatal digital.
- Autres causes : Le syndrome CHARGE peut être responsable d'anomalies de l'oreille jusque dans 50% des cas (Phillips).

Les anomalies acquises peuvent être de différentes causes. Une ossification labyrinthique peut survenir sporadiquement en cas de méningite (cause la plus fréquente chez l'enfant), d'otite, d'otosclérose, de traumatisme ou de chirurgie. Suite à une méningite, c'est en général, la proximalité de la scala tympani la première touchée car proche de l'aqueduc de la cochlée et de la fenêtre ronde par lesquels surgit le liquide céphalo-spinal (Lo 1998). L'ossification est parfois précédée d'une fibrose, laquelle s'ossifie presque toujours dans un second temps. Cette ossification est détectée en TDM dans plus de 85% des cas (Lo).

Détection :

Environ 25 % des SNS ont des anomalies tomodensitométriques sur une évaluation visuelle

simple par un neuroradiologue. Mais cette inspection visuelle peut manquer des anomalies subtiles et notamment des anomalies de taille sans anomalie morphologique (Purcell 2003b). Purcell et al (2003a) ont constaté 6 anomalies sur 15 cas de surdité neurosensorielle (40 %)   type de dysplasie du CSCL (dans 6 cas), d'hypoplasie cochléaire (4 cas), de dysplasie des CSCA et CSCP (2 cas). Ils estiment que la mesure systématique de 25 dimensions dans les plans axial et coronal permettrait de mieux déceler les anomalies de l'OI qu'une inspection visuelle globale. Toutefois, ils reconnaissent le caractère impraticable de cette démarche et se sont donc attachés à déterminer quelles étaient les mesures les plus utiles. Ils concluent que la hauteur de la cochlée dans le plan coronal (normale comprise entre 4,27 mm et 6,35 mm) et la largeur de l'os du CSCL dans le plan axial (normale comprise entre 2,97 mm et 4,37 mm) sont 2 mesures suffisantes pour détecter les anomalies de l'OI. Et cela, même si l'anomalie la plus commune est un élargissement de l'aqueduc vestibulaire (avec une normale définie comme inférieure à 1,5 mm). La seconde anomalie la plus fréquente est une dysplasie du CSCL (laquelle semble toujours présente en cas d'anomalie des autres CSC). Enfin, une malformation cochléaire arrive en 3^{ème} position. Purcell et al. (2006) ont mesuré la hauteur cochléaire et l'îlot osseux du CSCL chez 109 sujets dont 46 avec une SNS. Ils constatent que la reproductibilité intra et inter-observateur sont excellentes. Ils concluent en proposant des mesures normatives : Hauteur cochléaire normale si comprise entre 4.4 et 5.9 mm, îlot osseux du CSCL compris entre 2.6 et 4.8 mm.

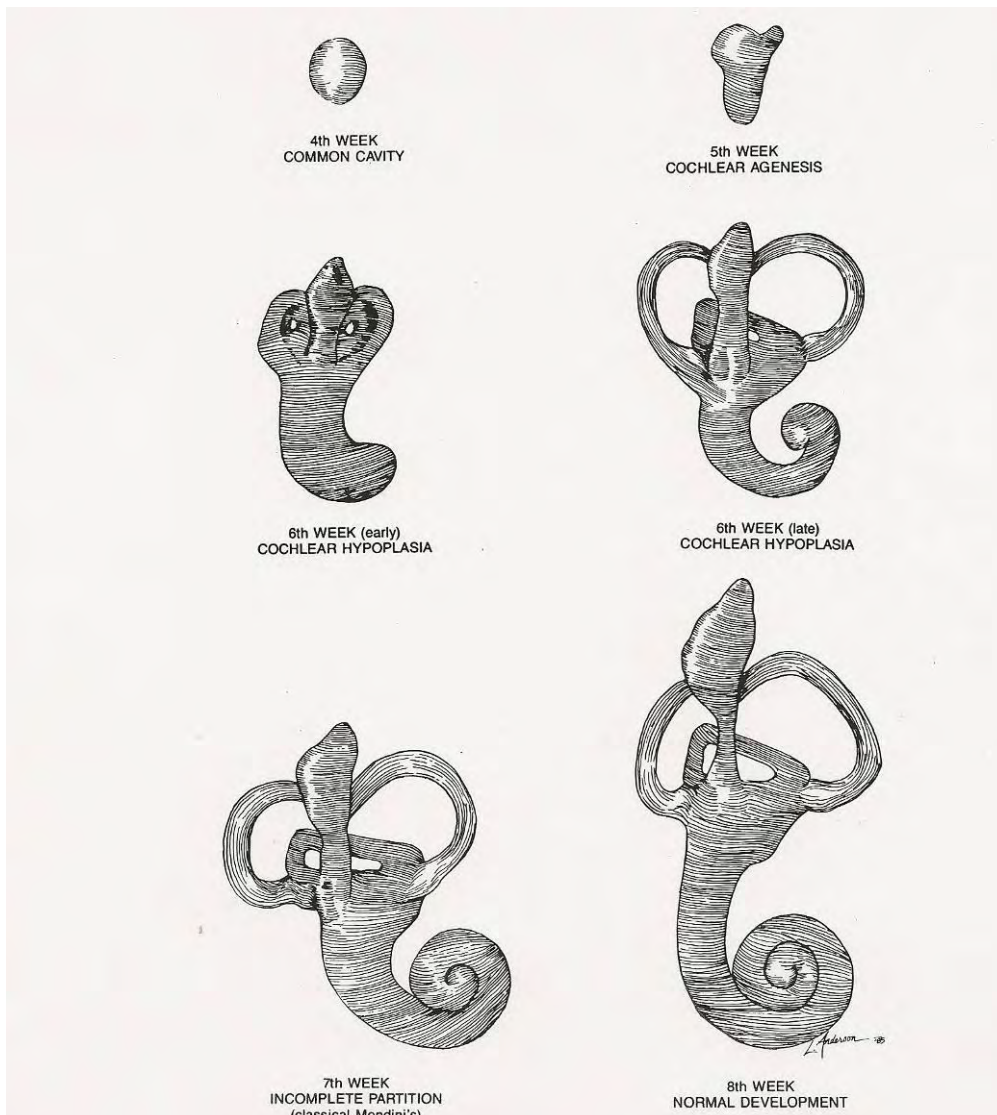
Bamiou et al (2000) ont fait part d'une série de 116 enfants avec une SNS (acronyme SNHL en anglais) dans leur centre ORL r f rent. Les étiologies sont génétique à 44%, idiopathique   19.8%, congénitale dans 12.6%, liées à des complications pré ou péri-natales dans 11.2%. Ils constatent des anomalies tomodensitométriques dans 28.4% avec une dilatation de l'AV (comme premier signe), et des anomalies des CSC (en second). Le caractère progressif de la SNS, le caractère profond de la surdité et les anomalies crânio-faciales sont significativement précurseurs d'anomalies tomodensitométriques.

Chen (2008) a étudié en TDM 204 patients (de 2 mois à 17 ans d'âge) dont 94 avec surdité et 110 sans surdité. Il a effectué 4 mesures : Diamètre du tour basal de la cochlée, îlot osseux du CSCL et du CSCA, et hauteur de la cochlée. Il a constaté à l'inspection visuelle des anomalies dans 26% des oreilles avec SNS et dans 5% de celles sans. Il n'a pas constaté de différences significatives des 4 mesures sus-citées entre les OI avec ou sans surdité et conclue donc à leur inutilité. La lumière du tour basal de la cochlée est une mesure non discriminante sans doute en raison de sa faible dimension. Les autres mesures sont plus discriminantes même si elles n'apportent pas de différences utilisables significativement. La reproductibilité de ces mesures par 2 lecteurs a été bonne avec toutefois des biais systématiques allant dans le même sens.

Mafong (2002) a rétrospectivement étudié 114 enfants atteints de SNS. Il a constaté des anomalies qualitatives dans 37% des cas en TDM. Les 3 premières anomalies par ordre de

fréquence étant : Large aqueduc vestibulaire, dysplasie du CSCL et dysplasie cochléaire.

Les anomalies cochléaires classiques les plus graves comprennent les partitions incomplètes, l'aplasie cochléaire, les déformations de Michel ou de Mondini (Sennaroglu). L'aplasie labyrinthique complète (ou aplasie de Michel) a été décrite dès 1863 (Ozgen). Elle est rare car liée à un arrêt du développement de l'OI avant la 3^e semaine de gestation. Le phénomène principal est une aplasie du nerf cochléo-vestibulaire. Elle s'accompagne d'une hypoplasie de l'apex pétreux, d'un aplatissement du mur médian de l'oreille moyenne, d'une malformation de l'étrier (il faut rappeler que le plateau de l'étrier a une origine embryologique différente du reste de l'étrier), d'une atrophie du CAI et d'un défaut de couverture osseuse du bulbe jugulaire.



D'après Jackler, embryogénèse des malformations cochléaires

Syndrome vestibulaire :

C'est un trouble de l'équilibre et/ou de la marche qui peut s'accompagner de vertiges. L'examen clinique va constater un nystagmus, une ataxie vestibulaire (signe de Romberg labyrinthique, déviation des index, démarche ébrieuse ou aveugle).

Il peut être périphérique (c'est à dire originaire de l'OI ou du nerf vestibulaire) ou central (cerveau).

Une origine périphérique est suspectée si les vertiges sont francs, des signes cochléaires sont associés (acouphènes, hypoacousie). Les causes congénitales sont la plupart du temps les mêmes que celles des anomalies cochléaires et les malformations les touchent souvent ensemble. En TDM, les anomalies visualisées le plus fréquemment au niveau de l'OI sont celles de l'AV (Sando). Les causes périphériques acquises sont nombreuses : Vertige paroxystique positionnel bénin, Maladie de Ménière, Névrite vestibulaire, Labyrinthite, Traumatisme crânien, Schwannome vestibulaire. La maladie de Ménière se caractérise cliniquement par une grande crise vertigineuse qui dure plusieurs heures, avec ou sans acouphène ou sensation de plénitude associés. Elle est récurrente et peut être associée à une surdité fluctuante marquée sur les graves. L'origine de la maladie de Ménière est liée à un hydrops endolymphatique, c'est à dire à une pression trop élevée de l'endolymphe. L'IRM 3T permet de visualiser l'hydrops sous forme d'un ratio aire endolymphatique/liquide vestibulaire >33% (la délinéation des cavités est possible en séquence FLAIR après injection de Gadolinium). D'un point de vue anatomopathologique, Michaels (2009) a constaté une anomalie des cellules cartilagineuses dans le vestibule postérieur.

Les causes centrales sont constituées de toute cause affectant les noyaux vestibulaires du tronc ou les aires corticales dédiées : SEP, tumeur, AVC,

Ces causes sont congénitales ou acquises. Les anomalies cliniques sont souvent limitées car, contrairement à l'audition, d'autres systèmes que l'OI participent à l'équilibre et peuvent in fine compenser un défaut vestibulaire.

V MATERIEL ET METHODE

Objectifs de l'étude

Objectif global : Etudier l'évolution de la croissance osseuse de l'oreille interne (OI) chez le fœtus humain de 20 à 40 SA.

Objectifs spécifiques :

- 1) L'étude cherchera à déterminer l'âge fœtal auquel différents composants de l'OI atteignent la taille adulte. Evaluer l'existence d'une éventuelle dysmorphie sexuelle ou d'une asymétrie droite-gauche.
- 2) Evaluer l'orientation des CSC durant le développement fœtal. Evaluer l'existence d'une éventuelle dysmorphie sexuelle ou d'une asymétrie droite-gauche.
- 3) Etudier le positionnement du vestibule dans le rocher durant le développement fœtal.

Description de la banque foetale

Le service de thanatologie du CHU de Toulouse dispose d'une banque de 167 fœtus conservés par fixation chimique et mise sous vide.



Ces fœtus ont été conservés dans les suites d'une interruption de grossesse (4 de cause non déterminée, 60 FCS, 33 IMG, 59 MIU, 11 mort-nés) avec l'accord de leurs parents et conformément aux préconisations du comité d'éthique de l'hôpital.

Leur âge est connu de façon précise en raison d'un suivi obstétrical satisfaisant précédant l'interruption de grossesse. De plus, une corrélation satisfaisante de leur âge a été rapportée avec la longueur du fémur (Minier) et avec l'ilion (Mokrane, Adalian).

Méthode d'exploration tomodensitométrie

Les fœtus ont eu un examen tomodensitométrie avec un tomodensitomètre (TDM) Sensation 16 (Siemens, Erlangen, Allemagne) avec une collimation de 16 x 0.75 mm. Les paramètres d'acquisition ont été une matrice 500x500 pixels avec 1 filtre osseux. L'épaisseur de coupe de 0.75 mm tous les 0.4 mm.

Les données ont été enregistrées de façon anonyme.

Traitement des données

Les images en format Dicom (Digital Imaging and Communications in Medicine) ont été traitées et analysées sur le logiciel Amira 5.2.2[®] (Mercury Computer System, Inc, Chelmsford, MA). Le fenêtrage était généralement de -200 à +2000 sauf pour les sujets faiblement minéralisés, où le fenêtrage utilisé était de -2000 à +2000.

Les mesures ont été réalisées avec des marqueurs numériques et enregistrées en mm dans un fichier excel (Microsoft).

Analyse

Deux plans d'analyse ont été utilisés:

-Plan axial : parallèle au plan du CSC latéral, plan d'analyse conventionnel de l'OI

-Plan coronal : perpendiculaire au précédent.

Sur les 167 fœtus ayant eu une TDM, 14 se sont avérés d'une mauvaise qualité ou avec une dégradation de la base du crâne rendant leur exploitation difficile. 153 fœtus ont donc été jugés exploitables.

Séquençage de l'étude

1) Mesure de distances caractéristiques de l'OI (Morphométrie)

- Pour identifier les mesures reproductibles, un premier temps a consisté à évaluer la variabilité intra-observateur dans la mesure de différentes distances (dans un plan axial, sauf 1 mesure dans le plan coronal).

Mesure de 17 distances d'un seul côté (gauche) chez 10 fœtus à 2 semaines d'intervalle :

- Vestibule : diamètre transversal et longitudinal
- Aqueduc vestibulaire : longueur, largeur, ouverture.
- CSC latéral : diamètre îlot osseux, diamètre canal
- Cochlée :
 - plan axial : largeur du tour basal, plus grand axe tour basal, largeur
 - plan coronal : hauteur cochlée
- Aqueduc de la cochlée (AC) : longueur, base, tunnel
- Conduit auditif interne (CAI) : largeur ouverture, profondeur
- Ossification du rocher : plus grand axe de l'hyperdensité osseuse.

La variabilité intra-observateur (mesurée par le coefficient de corrélation intra-classe) a été significative pour les 3 distances mesurées de l'aqueduc vestibulaire, indiquant une faible reproductibilité. Elle s'est avérée non significative ($p < 0.05$) pour les 14 autres mesures.

- Dans un second temps, on a mesuré ces 14 distances des 2 côtés (droite et gauche) chez 10 fœtus, pour étudier la variabilité droite-gauche.

- Dans un troisième temps, ces 14 distances ont été mesurées d'un seul côté chez les 153 fœtus (72 féminins, 81 masculins) exploitables.

Statistiques

La variabilité intra-observateur a été évaluée chez 10 fœtus par le coefficient de corrélation intra-classe (ICC).

La variabilité droite-gauche a été évaluée pour 14 dimensions chez 10 fœtus par le test de Wilcoxon.

La corrélation des 14 dimensions reproductibles avec l'âge ont été faites par le coefficient de corrélation intra-classe (ICC).

Le logiciel du programme statistique R® a été utilisé. Les différences ont été considérées

comme significatives à $p < 0.05$.

Tableau : Caractéristiques de l'échantillon de 153 foetus selon âge et sexe

Age (SA)	Total	M	F
21	4	1	3
22	29	16	13
23	23	12	11
24	16	8	8
25	14	8	6
26	12	8	4
27	3	2	1
28	2	0	2
29	3	2	1
30	3	1	2
31	6	5	1
32	5	2	3
33	6	2	4
34	3	2	1
35	4	2	2
36	2	1	1
37	5	2	3
38	9	5	4
39	1	1	0
40	3	1	2

M= Mâle, F= Femelle

Tableau : Description des 14 distances mesurées

	Structure	Description
1	Cochlée antéro-post	De l'apex jusqu'au plancher du tour basal
2	Cochlée tour basal longueur	Longueur maximale du tour basal
3	Cochlée tour basal	Diamètre maximal de la lumière mesuré à mi-longueur
4	AC longueur	Longueur de son axe longitudinal
5	AC base	Largeur maximale à sa base
6	AC tunnel	Longueur de l'axe longitudinal du tunnel
7	Vestibule longueur	Mesurée à sa moitié
8	Vestibule largeur	Mesurée à sa moitié, perpendiculaire à longueur vestibulaire
9	CSCL diamètre	Mesuré à sa partie postérieure, proche du vestibule
10	CSCL îlot osseux	Ligne médiane entre l'apex du CSCL et le vestibule
11	CAI longueur	Longueur maximale de l'apex à la moitié de la base
12	CAI base	Distance maximale de la base
13	Cochlée hauteur	Hauteur oblique (plan coronal)

Figure : Distances mesurées dans le plan axial :

A= Vestibule longueur, vestibule largeur, CSCL îlot osseux, CSCL diamètre

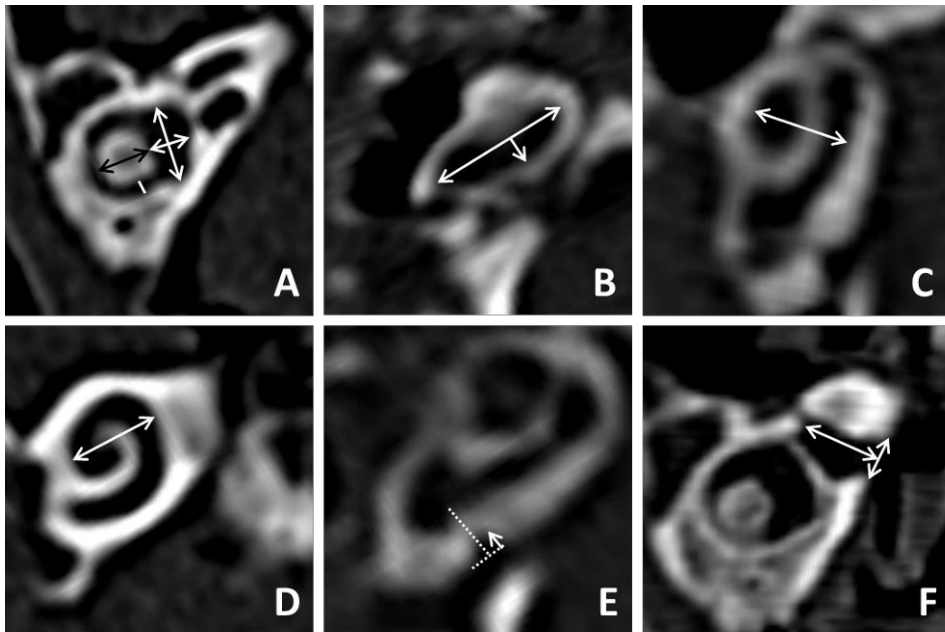
B= Tour basal de la cochlée longueur et diamètre

C= Cochlée

D= Cochlée (dans le plan coronal)

E= AC longueur, base et tunnel

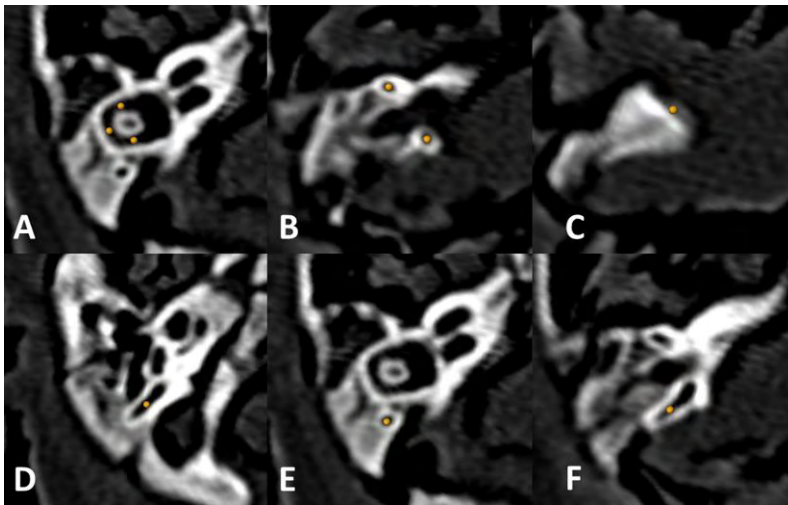
F= CAI base et longueur



2) Orientation des CSC homolatéraux durant la vie foetale :

L'orientation des CSC a été étudiée sur un échantillon de 54 fœtus (31 de sexe masculin, 23 de sexe féminin). Pour chacune des différentes catégories d'âges suivantes (22 SA, 24 SA, 26 SA, 29-31 SA, 34-36 SA, 38-40 SA), 9 fœtus ont été étudiés.

Pour chaque CSC, 3 landmarks ont été placés grâce au logiciel Amira 5.2.2, permettant d'obtenir des coordonnées (x, y, z). Les landmarks ont été placés au milieu de la lumière des CSC: 1 à l'apex de l'arc, 2 points aux pieds de l'arc en évitant l'ampoule et le trajet commun CSCA-CSCP (« common crus ») (cf figure suivante).



Landmarks du CSCL (A), du CSCA (B, C) et du CSCP (D, E, F).

Les coordonnées ont été ensuite traitées grâce au logiciel SciLab 5.4.1 (Scilab Enterprises, Orsay, France) permettant d'obtenir les 3 angles formés entre les 3 CSC : CSCL-CSCA, CSCL-CSCP et CSCA-CSCP.

Pour étudier la reproductibilité des mesures :

- la variabilité intra-observateur a été étudiée sur 11 fœtus à 1 semaine d'intervalle par un neuroradiologue (avec une expérience de 10 ans en imagerie du rocher).
- la variabilité inter-observateur a été étudiée sur 11 fœtus avec un second observateur non radiologue et sans expertise en imagerie de l'oreille. La distribution des valeurs étant de type normal, un test de coefficient de corrélation intra-classe a été utilisé.

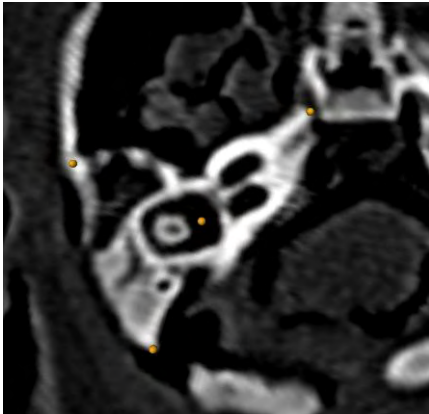
Statistiques

Les variabilités intra et inter-observateurs ont été étudiées par le coefficient de corrélation intra-classe (ICC). Pour étudier la corrélation avec l'âge et le sexe, et compte tenu de la taille de l'échantillon (54 fœtus), un test non-paramétrique de Kruskal-Willis a été utilisé.

Le logiciel du programme statistique R® a été utilisé. Les différences ont été considérées comme significatives à $p < 0.05$.

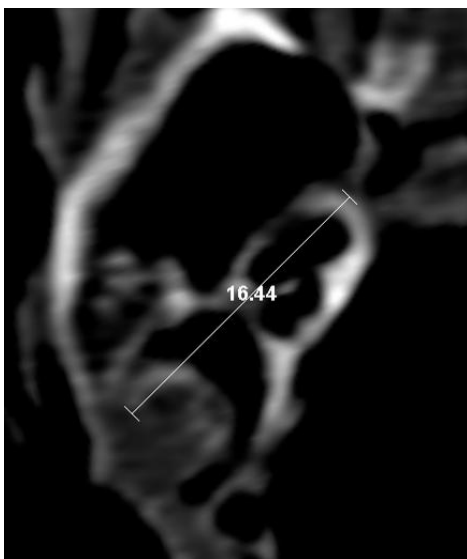
3) Evolution de la position du vestibule par rapport au rocher durant la croissance fœtale

Avec le logiciel Amira, 4 landmarks ont été placés permettant d'obtenir des coordonnées (x,y,z) : 1 au centre du vestibule au niveau du plan du CSCL, 3 à chacun des 3 angles du rocher (pointe, base antérieure, base postérieure) au même niveau que le centre du vestibule (cf figure suivante).



Une analyse procrustes des 4 landmarks a permis de suivre le positionnement du centre du vestibule au cours de l'âge fœtal sur un échantillon de 54 fœtus, 9 fœtus par chacune des catégories d'âges suivantes (22 SA, 24 SA, 26 SA, 29-31 SA, 34-36 SA, 38-40 SA). Pour cela, nous avons utilisé le logiciel MorphoJ 1.06b (Klingenberg lab, Manchester, RU).

Nous avons également mesuré l'évolution de l'ossification pétreuse qui a consisté en la mesure de la distance maximale du tissu ossifié (hyperdense) dans un plan axial (cf figure suivante).



Statistiques

L'analyse a été faite en composante principale.

VI RESULTATS

1) Morphométrie de l'OI

Nous n'avons pas constaté de variabilité droite-gauche (mesure chez 10 fœtus).

Il n'y a pas de dimorphisme sexuel sur les distances mesurées (chez les 153 fœtus).

Les mesures moyennes sont reproduites dans le tableau suivant.

Tableau : Résultats des mesures chez 153 fœtus

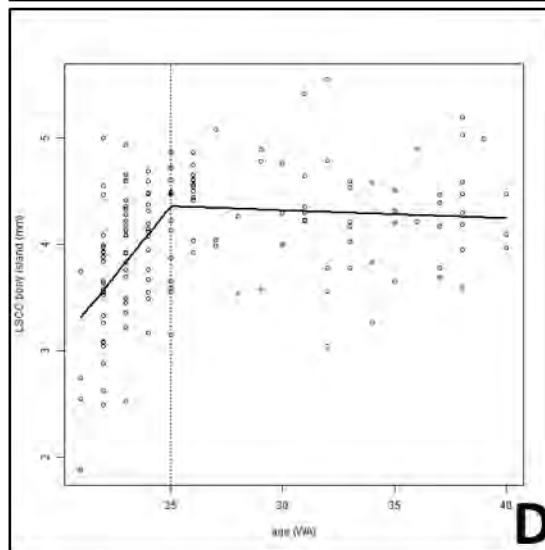
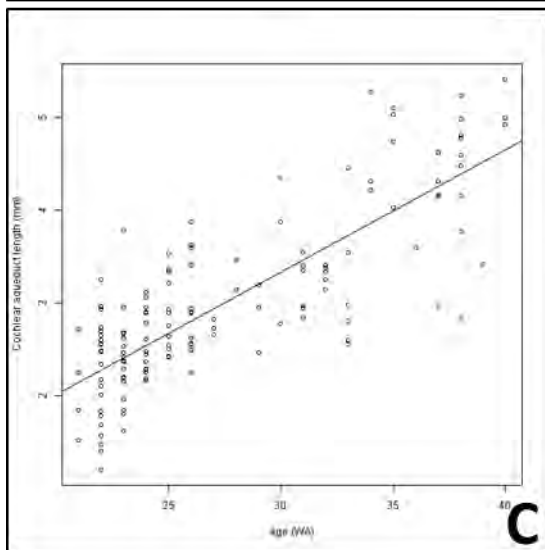
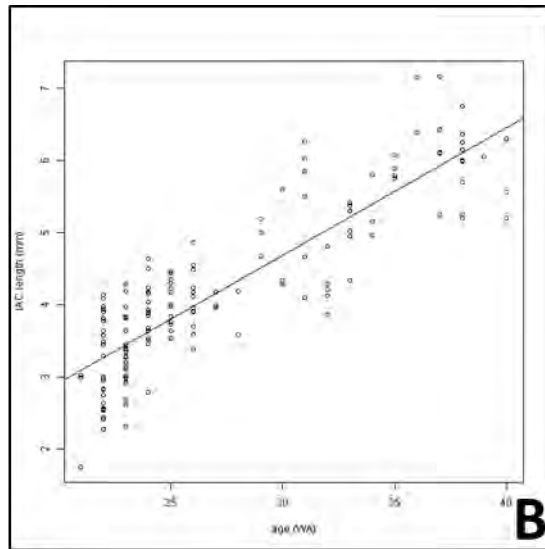
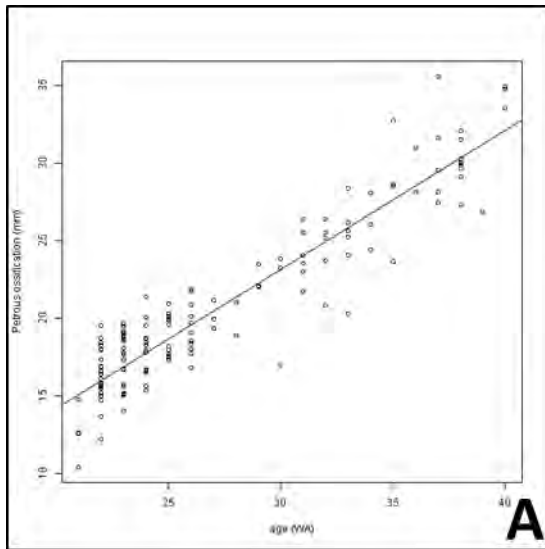
Structure	Moyenne (mm)	DS (mm)
Cochlée sens antéro-postérieur	4,22	0,40
Cochlée tour basal longueur	7,17	0,58
Cochlée tour basal lumière	1,45	0,19
AC* longueur	2,95	0,93
AC* base	1,89	0,61
AC* tunnel	0,89	0,42
Vestibule longueur	5,22	0,51
Vestibule largeur	2,64	0,39
CSCL diamètre	0,86	0,24
CSCL îlot osseux	4,06	0,94
CAI** longueur	4,19	1,18
CAI** base	3,04	0,92
Cochlée hauteur (plan coronal)	4,98	0,41

* Aqueduc de la Cochlée

** Canal auditif Interne

L'évolution de ces 13 mesures de l'OI a été confrontée à l'âge gestationnel (cf figures) :

- 4 (CAI, AC) sont significativement corrélées à l'âge
- 1 (îlot osseux du CSCL) augmente en taille jusqu'à 25 SA puis atteint un plateau
- Les 8 autres mesures (cochlée tour basal, cochlée, vestibule, diamètre du CSCL, base de l'AC) ne sont pas corrélées à l'âge.



A= Ossification pétreuse

B= Longueur du CAI

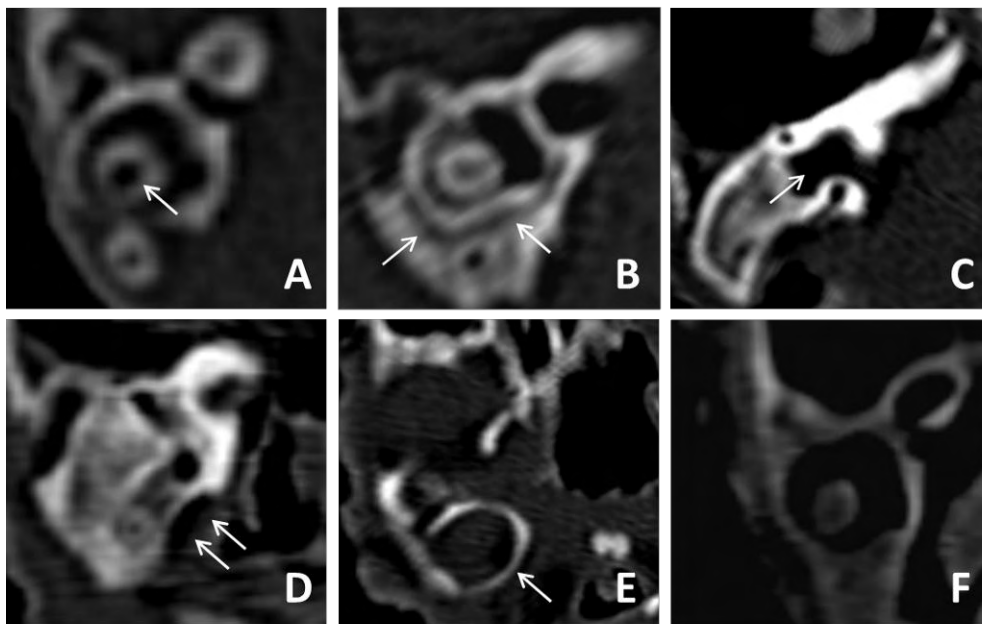
C= Longueur de l'aqueduc de la cochlée

D= Ilot osseux du CSCL

Evaluation qualitative de l'ossification :

Le rocher et l'OI se distinguent par une ossification encore incomplète aux âges les plus précoces. A 21 SA, aucun de nos spécimens n'était ossifié (100%) ; à 22 SA, 16 sur 29 (55%) était faiblement ossifié, à 23 SA, 7 sur 23 (30%), à 24 SA, 1 sur 16 (6%), à 25 SA, 1 sur 14 (7%), et à 26 SA, 1 sur 12 (8%). Au total, 30 spécimens sur 153 sont faiblement ossifiés.

Le rocher chez le fœtus se distingue également par quelques caractéristiques spécifiques (cf figure suivante) :



A : Déhiscence osseuse centrale de l'îlot du CSCL à 24 SA (A)

B : Défect périotique à 30 SA

C : Fossa subarcuata non ossifiée à 33 SA

D : Large aqueduc vestibulaire à 30 SA

E : Anneau tympanique à 24 SA

F : Tissu non ou faiblement ossifié à 21 SA

2) Orientation angulaire des CSC homolatéraux :

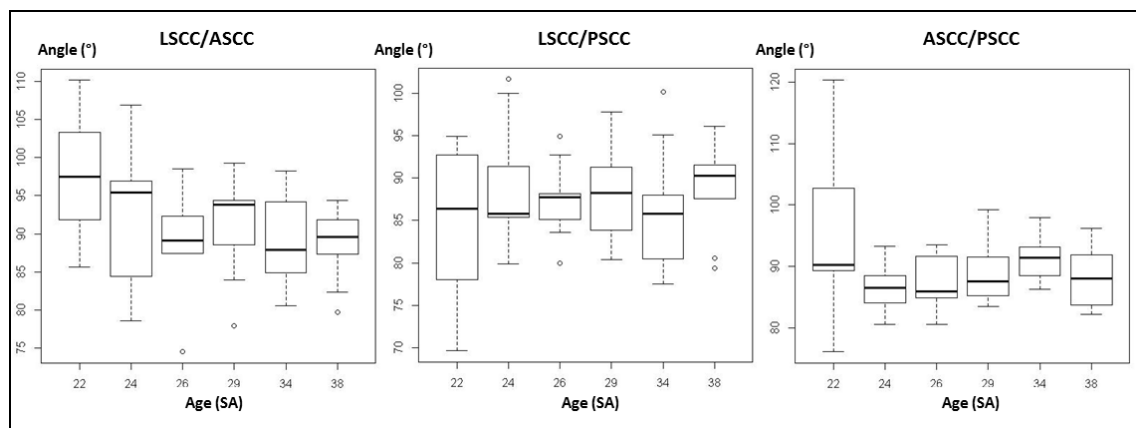
Les angles moyens entre les CSC homolatéraux sont de 88.67° (écart de 69° à 105°) pour CSCL-CSCA, 92.60° (écart de 78° à 110°) pour CSCL-CSCP et de 90.19° (écart de 59° à 103°) pour CSCA-CSCP. Les angles selon l'âge sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau: Angle entre les CSC homolatéraux à différents âges du fœtus (la valeur entre parenthèses est la déviation standard)

	22 SA 9 sujets	24 SA 9 sujets	26 SA 9 sujets	29-31 SA 9 sujets	34-36 SA 9 sujets	38-40 SA 9 sujets	Tous âges 54 sujets
LSCC<ASCC	82.55° (8.58)	87.48° (9.85)	90.54° (6.82)	88.97° (6.67)	91.20° (6.02)	91.29° (5.00)	88.67° (7.63)
LSCC<PSCC	94.97° (9.09)	90.88° (7.26)	92.59° (4.47)	91.98° (5.57)	93.83° (7.48)	91.36° (5.47)	92.60° (6.57)
ASCC<PSCC	84.50° (12.82)	93.39° (3.69)	92.69° (4.34)	90.53° (5.28)	88.79° (3.59)	91.25° (5.25)	90.19° (6.99)

Nous n'avons pas constaté de corrélation des angles avec l'âge avec $p=0.21$ pour CSCL-CSCA, $p=0.89$ pour CSCL-CSCP, $p=0.14$ pour CSCA-CSCP.

Les catégories d'âge de 22 SA et 24 SA sont associées à des valeurs de déviations standards élevées (cf figure suivante).



Variabilité entre les sexes :

Aucune différence significative entre les sexes (31 de sexe masculin, 23 de sexe féminin) n'a été constatée avec $p=0.094$ pour CSCL-CSCA, $p=0.937$ pour CSCL-CSCP, $p=0.331$ pour CSCA-CSCP.

Variabilité intra-observateur :

L'étude de 11 cas selon la même méthodologie par le même observateur à 1 semaine d'intervalle n'a pas révélé de variabilité avec un $p=0.82$ pour CSCL-CSCA, $p=0.66$ pour CSCL-CSCP, $p=0.70$ pour CSCA-CSCP.

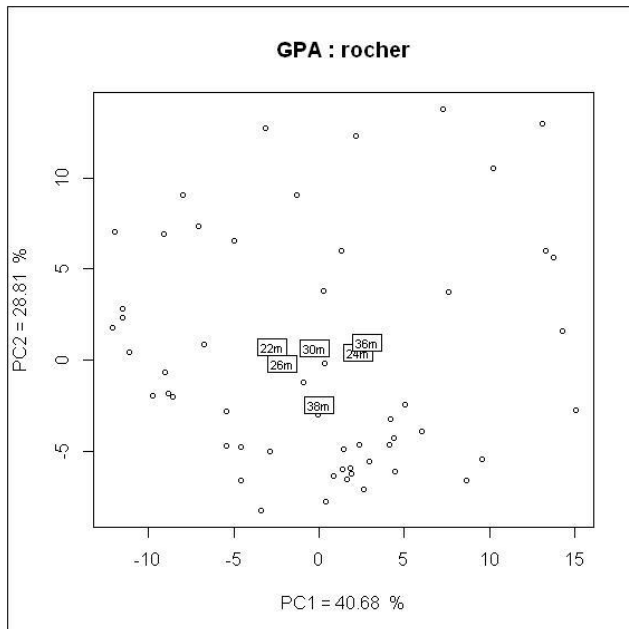
Variabilité inter-observateur :

L'étude de 11 cas selon la même méthodologie par un observateur différent n'a pas révélé de variabilité avec un $p=0.43$ pour CSCL-CSCA, $p=0.06$ pour CSCL-CSCP, $p=0.20$ pour CSCA-CSCP.

3) Positionnement du vestibule et croissance du rocher

a) Vestibule

L'analyse en composante principale de l'analyse procrustes à différents âges révèle la répartition suivante :



Ces 2 axes (PC1=40% et PC2=28%), donc cette représentation, expliquent 68% de la variabilité.

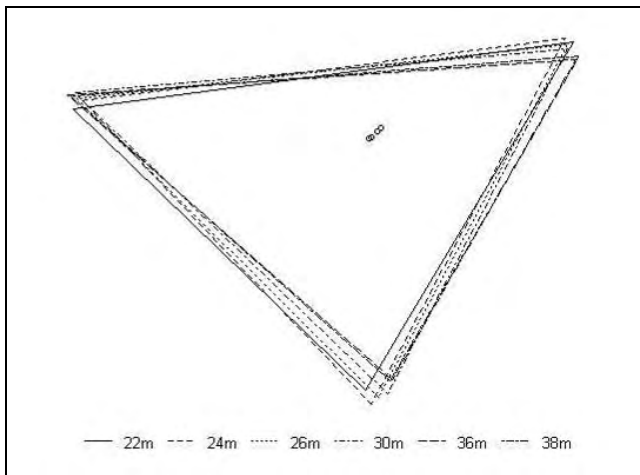
Les positions moyennes du centre du vestibule et des 3 pointes du rocher sont illustrées (projetées en 2D) dans la figure suivante :



Cette répartition révèle, toutes proportions gardées et tout au long de la période fœtale étudiée, une grande stabilité anatomique du centre du vestibule par rapport aux extrémités du rocher (en tout cas, en 2D dans le plan du CSCL).

Ce positionnement anatomique est représenté dans la figure suivante avec la forme moyenne du rocher (les 54 fœtus sont répartis en 6 catégories d'âge par souci de

simplification) et l'emplacement du centre du vestibule.

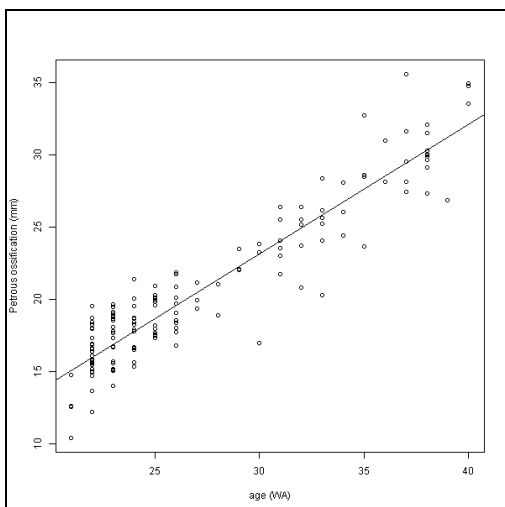


b) Croissance osseuse du rocher :

Il n'y a pas de différence significative droite-gauche (étude sur 10 fœtus). La taille moyenne de l'ossification pétreuse, étudiée chez 153 fœtus, est de 20,64 mm (+5,34). Il n'y a pas de différence entre les sexes. L'évolution de l'ossification selon l'âge est présentée dans la tableau suivant :

Age	21-25 SA	26-30 SA	31-35 SA	35-40 SA
Ossification pétreuse en mm (DS)	17,14 (2,08)	20,14 (2,07)	25,33 (4,93)	30,59 (4,92)

L'analyse statistique révèle une très haute corrélation de l'ossification pétreuse avec l'âge avec un ICC= 0,92 (figure suivante).



VII DISCUSSION

Plusieurs auteurs rapportent un âge gestationnel compris entre 18 et 25 SA auquel l'oreille interne atteint un âge adulte (Nemzek, Richard, Jeffery). Si un âge seuil a l'avantage de la simplicité, c'est sans doute une vision parcellaire car les différents composants peuvent croître à des rythmes différents avec une atteinte de l'âge adulte à des dates différentes (Richard). Toutefois, cette caractéristique d'atteinte de la taille adulte aussi précocement est unique parmi les organes des mammifères. Cela soulève par conséquent des interrogations sur l'importance de cet organe en physiologie qui requière qu'il doive être fonctionnel dès la naissance. Aussi, les études sur l'anatomie et le développement de l'OI sont nombreuses.

Elles sont moins nombreuses chez le fœtus humain pour des raisons évidentes, essentiellement éthiques, qui limitent la disponibilité de ce sujet d'étude.

Le moyen technique d'étude chez le fœtus humain a varié au long du temps en fonction des possibilités techniques du moment. Ces méthodes d'étude ainsi que les conditions de conservation ont une importance car certaines peuvent être responsables de biais d'observation.

L'apport de notre travail est marqué par un échantillon important (153 fœtus humains) étudié par de la tomodensitométrie à haute résolution (coupes infra-millimétriques). Même si la résolution est inférieure à celle d'une micro-TDM, l'effectif de notre échantillon reste, à cette date, inégalé pour les raisons mêmes de la limite du micro-TDM qui est de nécessiter un petit échantillon osseux (de quelques cm) et donc une dégradation des restes humains. Ainsi, si nos mesures sont légèrement moins précises (du fait d'une résolution moindre), elles seront plus fiables grâce à l'importance de l'effectif étudié.

Notre travail s'est focalisé successivement sur :

- 1) la morphométrie de l'OI
- 2) les angulations entre CSC homolatéraux
- 3) l'ossification pétreuse et la position du vestibule.

Le Fœtus comme sujet d'étude

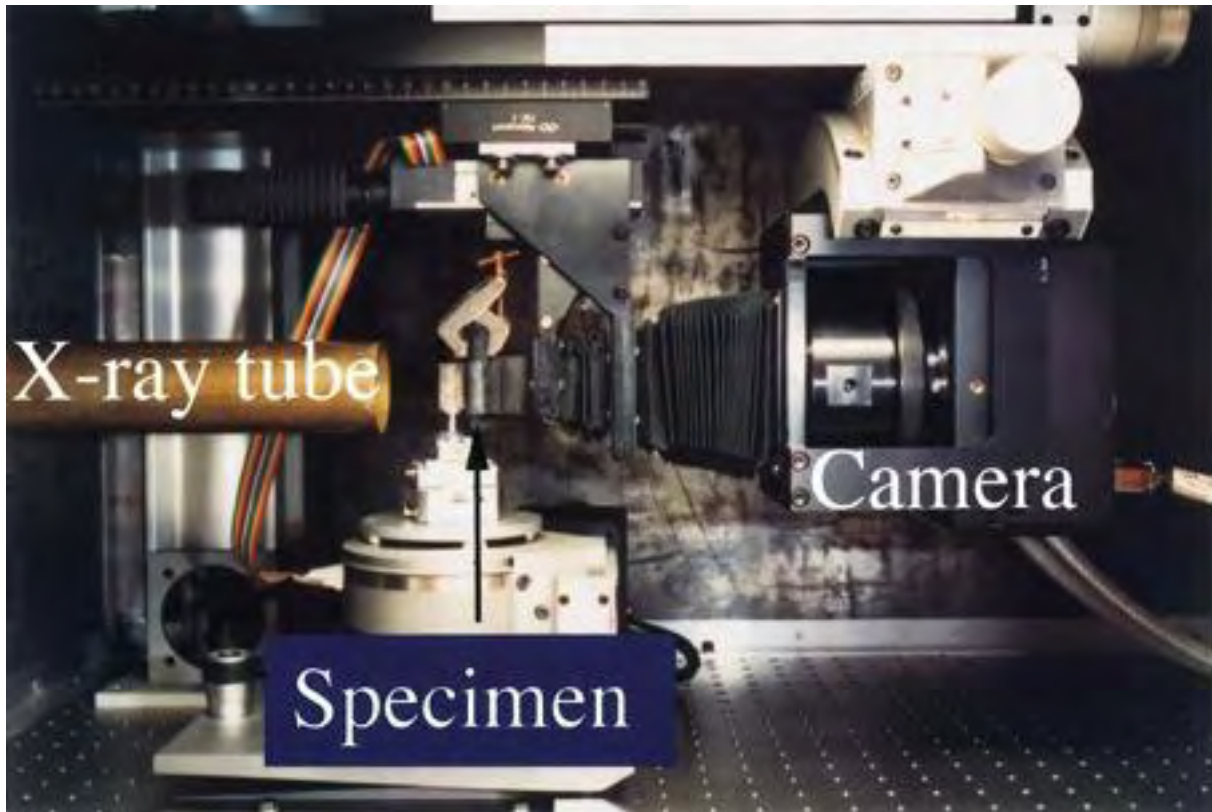
Méthodes de conservation du fœtus :

- fœtus frais : Cela peut se faire dans le contexte d'études foetopathologiques mais est rarement l'objet d'études sur l'OI.
- fœtus formolé (formaldéhyde) : Il peut résulter en une contraction tissulaire (jusqu'à 10%) du spécimen lors de la fixation. Les études peuvent être corrigées en ajustant la taille par un facteur de contraction (Ifediba) mais cela est rendu difficile par le caractère non uniforme de cette contraction. Bien entendu, des modifications mal connues surviennent lors du décès, surtout au niveau cellulaire des tissus mous (Curthoys).
- os temporal sec : Il nécessite un traitement pour la dessiccation ; plusieurs banques anatomiques ou anthropologiques utilisent ce moyen simple de conservation.
- fœtus vivant : Exploré par TDM ou IRM. Le rocher fœtal peut être éventuellement, et grossièrement, étudié par échographie (Odeh).

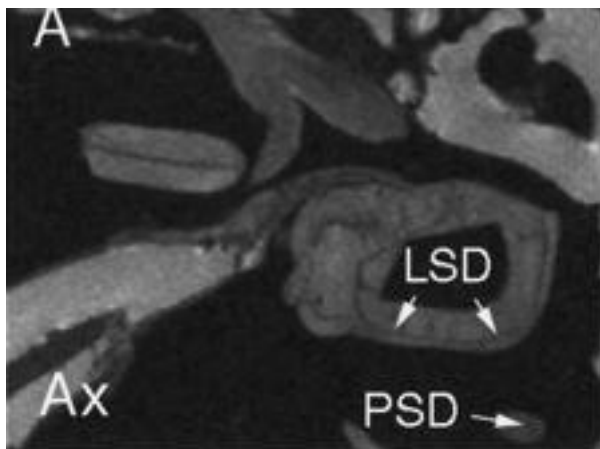
Moyens d'étude :

- Dissection et histologie : Qui nécessite une fixation chimique puis une déminéralisation, toutes deux génératrices de modifications artéfactuelles. En terme de résolution, c'est une technique inégalée car permet l'étude au niveau cellulaire.
- Moulage : Plusieurs produits peuvent être utilisés (silicone, ...). C'est la forme de l'organe en « négatif » qui est étudiée.
- micro TDM et micro-IRM : Si l'os étudié n'est pas sectionné, ces méthodes d'imagerie ne peuvent être réalisées qu'à partir d'un segment anatomique de quelques centimètres (3 à 4 cm au maximum). Donc on ne peut travailler qu'à partir de sujets morts.

Pour la micro-TDM, elle permet une résolution de 20 à 100 μm et sa première utilisation pour étudier l'os de l'OI date de 2004 (Lane 2004). Mais les acquisitions peuvent être longues (jusqu'à 8 heures) ce qui limite le nombre de sujets dans les études utilisant cette technique (11 dans l'étude de Richard et al.), et elle est moins performante pour l'étude des tissus mous. L'équipement est reproduit dans la figure suivante.



Quant à la micro-IRM, elle peut être utile dans l'étude des liquides remplissant l'OI. Lane et al (2005) ont décrit une méthode pour introduire du gadolinium dilué dans l'OI et l'étudier dans une IRM de 9.4 Teslas (alors qu'en pratique clinique, on ne peut aller que jusqu'à une puissance de 3 Teslas). La durée d'acquisition est également longue (plusieurs heures) mais la résolution spatiale est excellente (voxels cubiques de $78\ \mu\text{m}$ chez Lane) avec une qualité exceptionnelle de description anatomique des structures liquidiennes labyrinthiques (cf figure suivante).



- TDM: Cette technique a plusieurs avantages : Rapidité d'acquisition (quelques secondes), ne nécessite pas de préparation du tissu étudié, réalisable chez des sujets vivants ou décédés, équipement largement disponible, pas de contre-indication, excellente pour l'étude de l'os, résolution de quelques centaines de μm . Avec le scanner multibarrette (apparu au début des années 2000), la résolution a beaucoup gagné y compris dans les plans reconstruits. De très nombreuses études ont décrits son utilité pour l'OI en anatomie (Lane 2006) et en pathologie (Ala Eddine, Lemmerling, Casselman). Et même si elle est moins précise que la micro-TDM, des modèles mathématiques peuvent permettre d'affiner sa précision anatomique et de l'utiliser utilement en pratique clinique (Noble). Des inconvénients existent toutefois dont le principal est l'irradiation : par ailleurs, elle peut résulter en une magnification de 5% des structures anatomiques (Maher 1995).

- IRM : Cette technique reste limitée à l'étude des tissus mous ou liquidiens. Elle n'est donc utile dans l'OI qu'en complément du TDM. La résolution spatiale est très bonne. Cet équipement est devenu largement répandu et ses contre-indications sont devenues rares).

Etudes fœtales sur l'OI

Elles sont peu nombreuses (Nemzek, Porowski, Richard, Jeffery, Curthoys, Pyle) et ne concernent généralement que de faibles échantillons. Les techniques d'exploration sont variables : dissection (Arnold, Curthoys), moulage, imagerie (Nemzek, Richard).

Nemzek et al. (1996) étudièrent 18 fœtus en TDM et IRM. Ils mesurèrent le tour basal cochléaire et le CSCL et les corrélèrent à l'âge gestationnel. En comparant ces mesures à celles de 8 adultes, ils déterminèrent que les dimensions adultes étaient atteintes à 21 SA. A 11 SA, la spirale cochléaire est à 2,5 tours, tandis qu'à 18 SA est constatée l'ossification la plus précoce de la capsule otique.

Porowski et al. (Porowski 2003) ont étudié en TDM 8 fœtus âgés de 20 à 38 SA. A 20 SA, les CSC et la spire cochléaire sont déjà visibles. A 31 SA, une rampe osseuse est visible dans la cochlée et à 38 SA, tous les composants et compartiments du labyrinthe osseux sont visibles.

Richard et al. (Richard 2010) ont étudié en micro-tomodensitométrie 11 os temporaux fœtaux (de 17 à 39 SA) fixés au formol. Ils ont constaté que les différentes parties de l'OI atteignent les dimensions adultes à différents âges (CSC postérieur, fenêtré ronde et cochlée à 24 SA, fenêtré ovale à 35 SA, aqueduc vestibulaire pas avant la naissance). Ils observent une torsion progressive de chaque CSC. Si l'OI atteint l'âge adulte durant l'âge fœtal, certaines structures comme l'aqueduc du vestibule vont, au contraire, rétrécir entre 5 et 8 SA (Richard 2010).

1) Morphométrie de l'OI

Nous avons constaté que 8 mesures ne varient pas avec l'âge (de 21 SA à 40 SA) et qu'elles correspondaient aux données de la littérature. Une corrélation avec l'âge de certaines mesures (CAI, AC) existe, tandis qu'une mesure croissait jusqu'à 25 SA (îlot osseux CSCL).

Variabilité droite-gauche et entre les sexes :

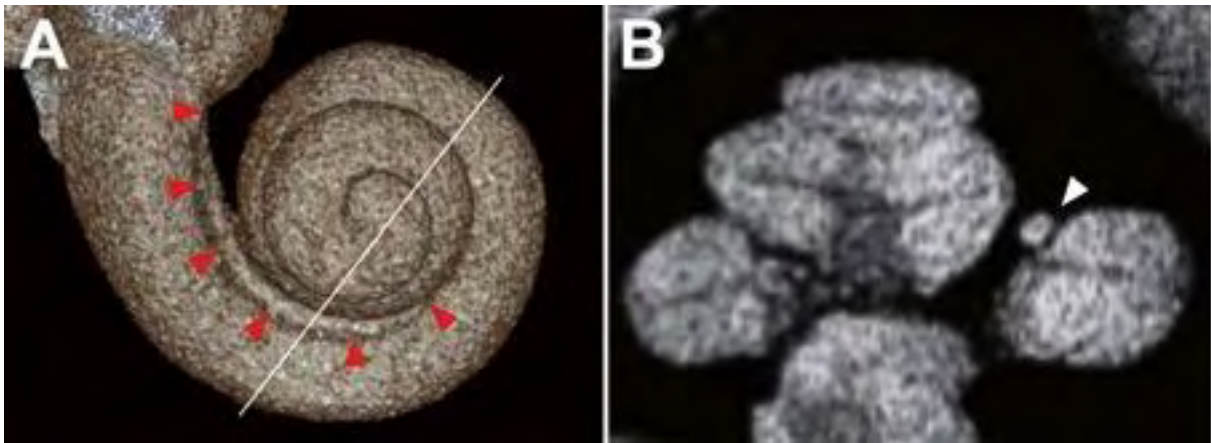
Nous n'avons constaté aucune différence significative droite-gauche ce qui est largement partagé dans la littérature (Shin, Teissier, Melhem).

Marcus (2013) a étudié en TDM 12 mesures anatomiques cochléo-vestibulaires chez 38 sujets (72 oreilles) de 2 à 18 ans (moyenne d'âge de 10 ans). Il n'a pas constaté de différence droite-gauche, mais une différence entre hommes et femmes pour 4 mesures sur 12 : largeur vestibulaire, longueur cochlée, hauteur coronale cochléaire et hauteur de l'ouverture du nerf cochléaire. Il a constaté une tendance statistique, mais non significative, dans 2 autres mesures. Ces mesures étant plus petites chez la femme que l'homme. Ils en concluent qu'il existe un dysmorphisme sexuel bien qu'ils ne l'aient pas constaté dans 8 mesures sur 12. Ce genre de conclusion est toujours discutable alors que l'hypothèse n'est vérifiée que sur une partie des mesures. Les résultats sont d'autant plus surprenants que cette population semble d'un âge inférieur à celui de la puberté.

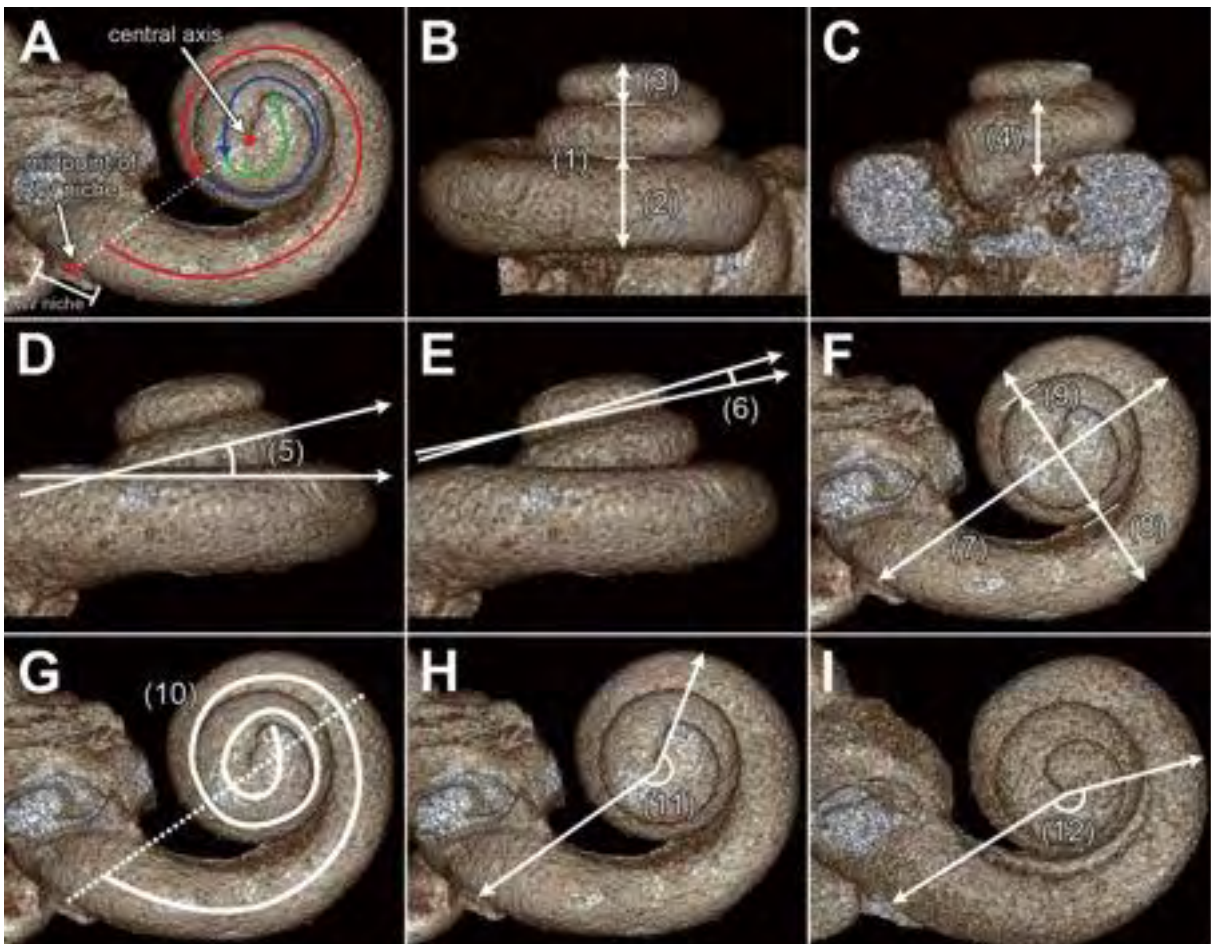
Melhem (1998) a étudié en IRM 1.5T, 23 sujets sains (12-72 ans) en mesurant, après segmentation semi-automatique, le volume de l'OI. Le volume moyen était de 227 mm³ sans différence selon l'âge, le sexe ou le côté. Il conclue que ces mesures sont remarquablement stables et que cela est dû à une croissance terminée in utero dès 25 semaines de gestation.

Nous n'avons pas constaté de différence significative entre les sexes ce qui est couramment admis chez le fœtus et généralement après la naissance (Shin, Lan). Quelques études constatent toutefois des différences, généralement avec des mesures plus élevées chez les sujets masculins. Sato et al (1991) ont étudié la cochlée humaine à partir de 18 os temporaux âgés de 1 jour à 76 ans. Ils ont mesuré la longueur de la cochlée à 37,1 mm chez les sujets masculins et à 32,3 mm chez les sujets féminins. La même équipe (Sato 1992) a étudié l'appareil vestibulaire à partir de 18 os temporaux en dissection. Ils ont constaté des dimensions supérieures chez les sujets masculins qu'ils rattachent à la différence de poids entre les sexes.

Shin (2013) a étudié 12 dimensions cochléaires de 39 os temporaux d'adultes en μ TDM. Il n'a pas constaté de différence droite-gauche ni entre sexes (à l'exception d'une mesure). La spirale cochléaire est en moyenne constituée de 2,54 tours (avec un écart entre 2,36 et 2,80). La distribution des mesures était de type normal avec de larges variations. Il visualise un canal cochléaire accessoire dans 51,3% (cf figure suivante).



D'après Shin et al. (2013), canal cochléaire accessoire



D'après Shin et al. (2013), 12 dimensions cochléaires

Mesures cochléo-vestibulaires standards

Les mesures de la cochlée ont de l'importance dans la détection de la pathologie, mais également dans la thérapeutique puisque l'implantation d'électrode cochléaire est facilitée par des mesures pré-opératoires. Les implants cochléaires ont été introduits commercialement en 1972 (Sobrinho 2009). La normalité d'un scanner pré-opératoire ne garantit toutefois pas l'absence d'obstruction cochléaire parfois constatée lors de la chirurgie. Aussi, l'IRM a été utilisée dans le but d'évaluer l'état de la spire cochléaire. La longueur de la spire est généralement mesurée entre 30 et 36 mm (Takahashi 1989, Ketten 1998).

Krombach et al. (2005) ont étudié par TDM 120 patients (53 souffrant de maladie de Ménière et 67 servant de contrôle). Ils ont mesuré de façon standardisée plusieurs distances significatives sur les 2 rochers. Dans le groupe contrôle, ils n'ont pas relevé de différence significative de mesure entre les côtés droit et gauche. En comparant les 2 groupes, ils ont trouvé 2 différences significatives : Canal singulaire plus long et aqueduc vestibulaire plus étroit dans le groupe des Ménière. Ils proposent d'utiliser ces mesures (dans le plan axial) pour dépister de façon routinière les anomalies de taille des structures de l'OI.

Tableau de mesures standards moyennes (en mm) dans la littérature :

Auteur	coc long	coc tb long	coc tb diam	coc AP	coc haut coro	coc Aq long	coc Aq base	coc Aq tunnel	vest long	vest larg	CSCL îlot osseux	CSCL diam
Nemzek 1996		7,8									"4,9"	
Purcell 2003a		8,59	2,15	3,96	5,31				5,8	3,4	3,67	1,29
Purcell 2006					5,13						3,69	
Krombach	9,1		1,7	5,1		12,5	3,9	4,9	6,3	3,5		1,3
Pappas							1,16		6,78	3,49		1,03
Chen			1,7		6,15						3,95	
Lan	8,67			4,46					5,95	3,17	3,64	1,38
Marcus			1,8	4,49	5				6	3	4	
Veillon		8,5		4,6					5,9-6	2,9	4	2,1
Shin				3,8								

* coc= cochlée ; long= longueur ; larg= largeur ; tb= tour basal ; AP= sens antéro-postérieur ; Aq= aqueduc; vest= vestibule ; diam= diamètre ; haut= hauteur ; coro= coronal

Pappas a publié en 1990 des mesures standards de l'OI constatées en TDM chez une série de 50 sujets pédiatriques normaux. A part pour l'AV et le CAI, il constate une remarquable reproductibilité des distances mesurées.

Mori et Chang (2012) ont étudié en TDM la largeur cochléaire en coronal sur 396 oreilles de sujets de 1 mois à 23 ans (moyenne de 7,3 ans). Cette distance était significativement plus petite chez les sujets de sexe féminin et chez ceux avec une SNS ou une surdité mixte. Chez 11 sujets ayant subi des TDM répétées, cette distance restait stable. Ils concluent néanmoins

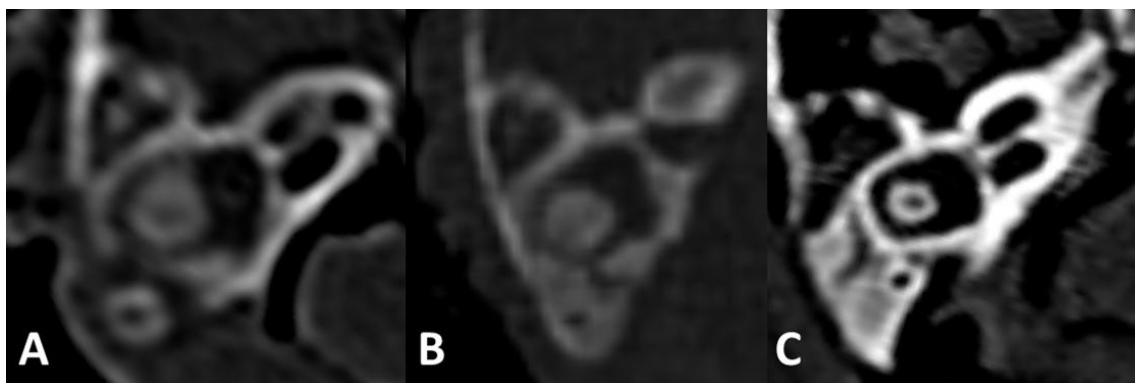
que la sensibilité de cette mesure pour dépister une surdité restait faible.

Teissier et al. (2010) ont mesuré des dimensions cochléaires (hauteur cochléaire, largeur second tour de la cochlée, largeur du canal cochléaire) chez des enfants sains et des enfants avec SNS. Seule la largeur du second tour de la cochlée est inférieure chez les SNS. Sans surprise, la variabilité est plus grande pour les plus petites dimensions.

La spirale cochléaire est formée dès 8-9 semaines de gestation (Pujol) avec un développement qui s'effectue de la base vers l'apex.

Purcell (2003a) a mesuré 23 dimensions chez 15 SNS et 15 témoins en TDM pour établir des valeurs normatives. Une mesure était considérée comme anormale si en dehors de 2 DS. Par cette méthodologie, il a dépisté des anomalies de l'OI chez 6 patients soit 40% tandis que l'inspection visuelle n'en détectait que 4. Il conclut que les mesures les plus utiles étaient l'îlot osseux du CSCL et la hauteur cochléaire en coronal. Lan (2009) a comparé en TDM 10 mesures standards (dans le plan axial) de 45 oreilles de 41 sujets sains et de 45 oreilles de 27 patients avec une surdité neuro-sensorielle (SNS). Il n'a pas constaté de différences significatives entre les sexes, ni en fonction de l'âge. Il a constaté 3 mesures significativement différentes (sur 10) entre les 2 groupes étudiés : îlot osseux du CSCS, îlot osseux du CSCL et hauteur maximale de la cochlée (les îlots osseux étaient plus petits en cas de SNS tandis qu'à l'inverse la hauteur de la cochlée est plus grande). Il conclut que ces 3 mesures pourraient aider au diagnostic des SNS.

Enfin, dans notre série, nous avons constaté que le diamètre mesuré du CSCL (0,86 mm) est inférieur aux données de la littérature (1,29 mm chez Purcell, 1,38 mm chez Lan). Ceci peut être dû à l'ossification de la capsule otique encore en cours (cf image suivante), responsable d'effet de volume partiel plus marqué chez le fœtus (Stjernholm). Cet effet peut être responsable de mesures non pertinentes (Spoor 1995).



Ossification du CSCL à 22 SA (A), 24 SA (B) et 34 SA (C).

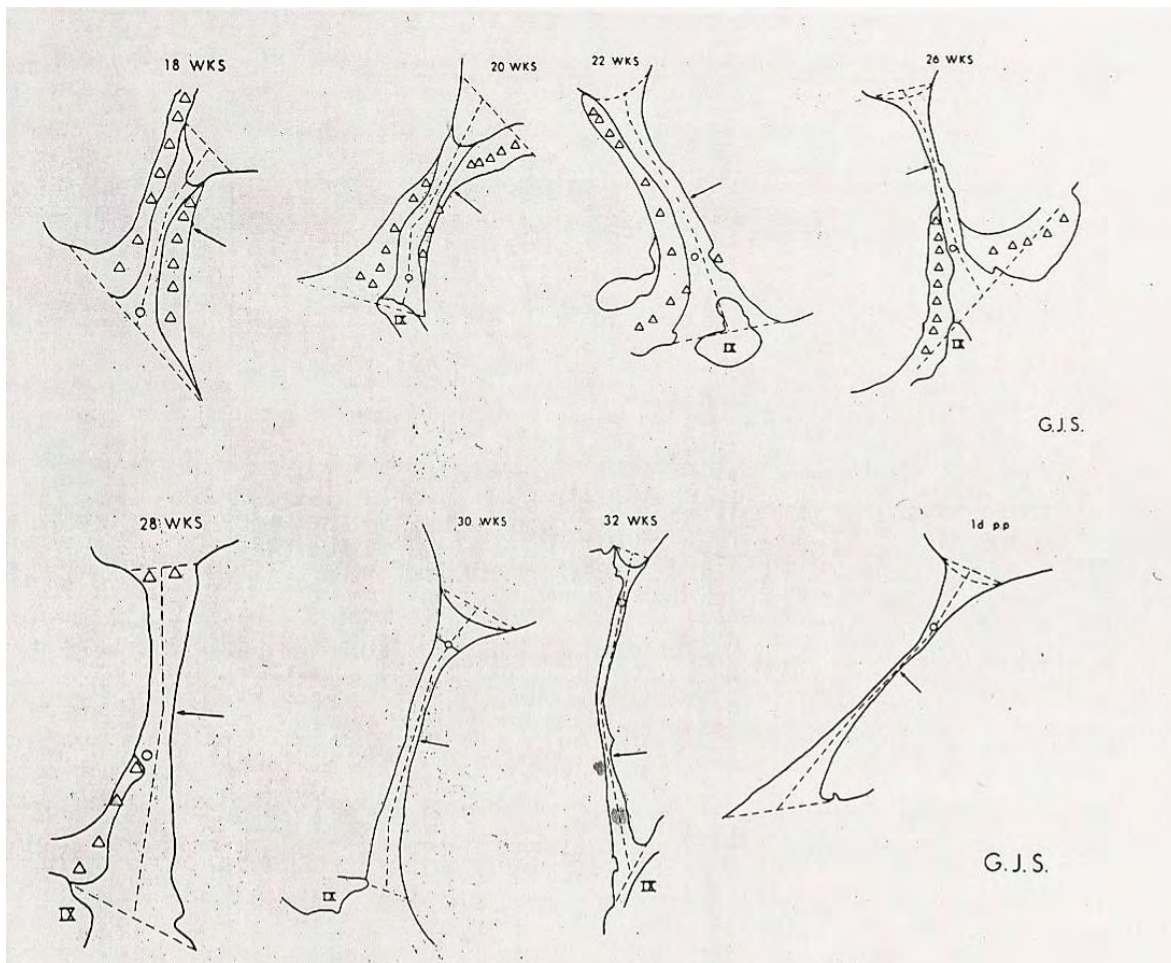
Le fait que la plupart des mesures de notre série ne croissent pas à partir de 21 SA, et le fait

que ces mesures soient conformes aux données de la littérature nous permet de conclure que la taille adulte est atteinte à 21 SA ou avant. Dans les études sur le fœtus humain, l'âge le plus précoce auquel l'OI est supposé avoir atteint l'âge adulte est de 18 SA (Richard). Il est donc possible que l'OI atteigne, pour la plupart de ses composantes, sa taille adulte entre 18 et 21 SA.

L'aqueduc de la cochlée (AC) :

L'aqueduc de la cochlée a fait l'objet d'études dédiées. Ce tunnel osseux, tapissé de tissu fibreux dérivé de la dure-mère et d'arachnoïde (Bachor), pourrait transmettre une pression des espaces sous-arachnoïdiens au labyrinthe. Bachor précise que l'origine de l'aqueduc est mésodermique et que sa perméabilité est discutée depuis sa découverte. Il peut contenir des cellules mononucléées et des érythrocytes (Bachor 1999). Bachor et al. (1997) ont étudié par dissection 21 os temporaux de 12 sujets (de la naissance à 9 ans). L'isthme de ce canal mesure entre 75 et 244 μm avec une ouverture externe mesurant au maximum 869 μm . La longueur de l'aqueduc augmente avec l'âge, les plus longs mesurant 10-11 mm. Notre mesure moyenne à 2,95 mm chez le fœtus est compatible avec les résultats de Bachor. Dans notre étude, nous avons constaté qu'il n'était pas visible dans 9 cas sur 153 (surtout à 21-22 SA) ; par contre, il est toujours visible entre 37 et 40 SA ce qui indique qu'il continue de se former pendant la seconde moitié de la gestation. Il est certain que la tomographie a grandement facilité l'exploration de cette structure même si il n'y a pas de pathologie spécifique en rapport (contrairement à l'aqueduc du vestibule); notamment, les variations de calibre semblent dues à de simples variantes anatomiques.

Spector (1980) a étudié le développement de l'AC chez le fœtus et le nouveau-né. Il note un double processus lié à l'ossification entre 26 et 40 SA : Rétrécissement dans la largeur du canal et augmentation de la longueur (cf illustration suivante).



D'après Spector (1980) : Dessins de l'AC à différentes étapes du développement foetal (IX= ganglion du nerf glosso-pharyngien supérieur).

Le CAI :

Nous avons constaté une forte corrélation des dimensions du CAI avec l'âge, notion largement décrite dans la littérature. Nous l'interprétons comme une partie de l'OI dont la croissance est étroitement liée à celle du rocher.

La croissance du CAI avant et après la naissance a été étudiée par Bonaldi et al (2004). Ils ont utilisé 49 crânes secs chez des sujets de 7 mois (de vie foetale) à l'âge adulte de 69 ans. Grâce à du moulage en silicone, ils ont étudié les mesures et les formes de 98 CAI. Ils notent une corrélation significative avec l'âge avec un CAI passant de 5,18-6,11 mm de long chez le foetus à 10,89-14,75 mm chez l'adulte (les variations dépendant de la surface mesurée, i.e. supérieure, inférieure, postérieure ou antérieure). Le diamètre évolue également de façon significative au niveau du porus (de 3,44 mm à 4,86 mm en vertical et de 4,02 mm à 7,03 mm en horizontal) ; le diamètre n'évolue que de façon faible ou inexistante à la partie médiane et au fundus. Le diamètre horizontal est plus grand que la composante verticale au niveau du porus, tandis que l'inverse est noté au niveau du fundus. Ce dernier, contigu au labyrinthe, ne changerait plus ni de taille ni de forme dès la fin de la vie intra-utérine. Les

changements de forme sont surtout effectifs dans la deuxième décennie. Des différences de dimension droite-gauche ont été constatées de façon hétérogène chez 10% des sujets. Ils concluent que cette corrélation avec l'âge est en rapport avec la croissance du rocher dans son ensemble.

Purcell (2003a) a mesuré la base du CAI à 6,93 mm en moyenne et sa longueur à 11,1 mm ; il considère toutefois que le CAI est trop variable dans sa morphologie pour permettre des mesures fiables. Krombach (2005) le mesure à respectivement 7,4 et 11,3 mm tandis que Pappas (1990) les a mesurés à 5,31 et 9,53 mm. Sakashita et Sando (1995) ont montré que le CAI croît en longueur de la naissance jusqu'à l'âge de 10 ans. Toutefois, le diamètre au porus ne croît, dans leur étude, que jusqu'à 1 an.

Aqueduc vestibulaire :

Nous n'avons pas réussi à mesurer l'AV en TDM de façon reproductible dans notre évaluation de la variabilité intra-observateur. Notre constatation visuelle est que l'AV variait beaucoup en morphologie avec un aspect aplati et large nous empêchant de retrouver des repères fiables. Aussi, nous n'avons pas effectué cette mesure dans notre échantillon de 153 fœtus. Pyle (2000) l'a mesuré par dissection chez 29 embryons et fœtus (de 5 semaines de gestation jusqu'au terme). Il a constaté que l'AV croît de façon non linéaire pendant toute la gestation. Sa croissance ne se terminant qu'à 3 ou 4 ans. Il conclut qu'un syndrome de « large AV » serait dû à une croissance aberrante. A l'inverse, Jackler et al estiment que l'AV est initialement large et qu'un processus de rétrécissement survient avant la naissance.

Kodama et Sando ont étudié en dissection le développement post-natal de l'AV (1982a). Ils ont constaté une croissance en taille jusqu'à l'âge de 3 ans. Ils ont également étudié son anatomie (1982b) en insistant sur la grande variabilité de sa morphologie.

Appréciation qualitative :

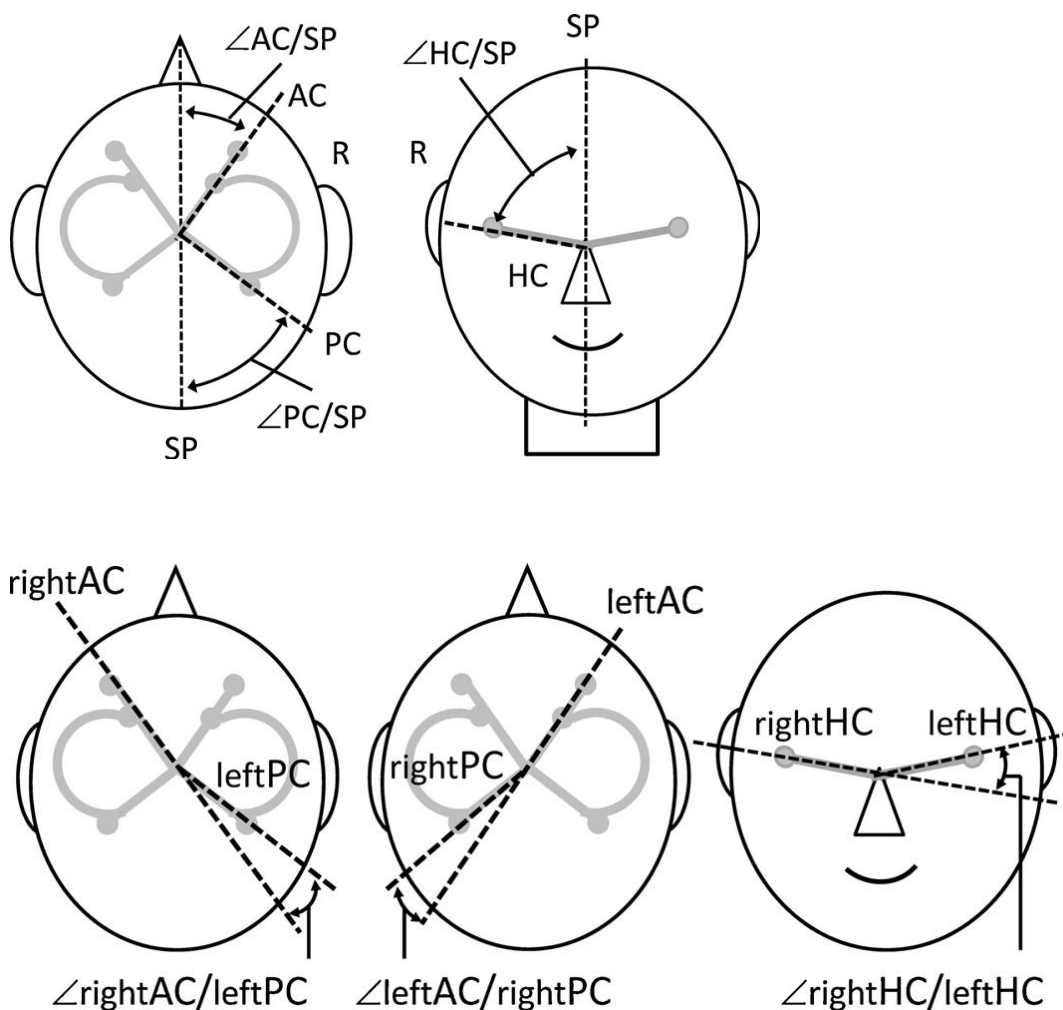
Nous avons constaté un certain nombre d'aspects radiologiques qui sont spécifiques au fœtus : anneau tympanique, défaut d'ossification, fossa subarcuata,

Chadwell (2004) a étudié les TDM de 100 enfants non sourds de 0,5 à 19,3 ans. Il s'est focalisé sur le « cochlear cleft » qu'il décrit comme une zone linéaire (en forme de C) hypodense à la partie moyenne de la capsule otique, parallèle au tour basal de la cochlée. Cet aspect était présent chez 41% des sujets, bilatéral dans 26%, et diminuant avec l'âge. Il est rattaché par les auteurs soit à un aspect de fissula ante fenestram, soit à une interface entre la couche moyenne enchondrale et la couche externe périostée de la capsule. Cet aspect constaté par Chadwell existe dans notre série fœtale et concerne tout le pourtour de la capsule otique, il est notamment bien visible autour du CSCL. Nous rattachons cet aspect à une ossification encore en cours, avec une densité d'ossification variable en fonction des couches osseuses.

2) Orientation des CSC

L'orientation des CSC a suscité une littérature abondante pour son intérêt physiologique et surtout thérapeutique lié à l'équilibration. En effet, plusieurs manœuvres diagnostiques et thérapeutiques (calorique, rotationnelle) sont basées sur la stimulation du contenu canalaire de façon à le mobiliser sélectivement. Pour cela, l'angulation approximative doit être connue de façon à optimiser le mouvement requis. Le fait que la stimulation d'un canal provoque un nystagmus dans le même plan est connu depuis longtemps (dès Flourens en 1828, Ewald en 1882).

Une vision idéaliste s'est formée à partir des premières études considérant que les 3 CSC devaient être strictement orthogonaux à 90° avec un angle entre la ligne médiane du crâne et les CSC antérieur + postérieur à 45°. Ce modèle canonique était complété par la croyance en une planarité absolue des CSC et une coplanarité des CSC synergistiques (Berlin).



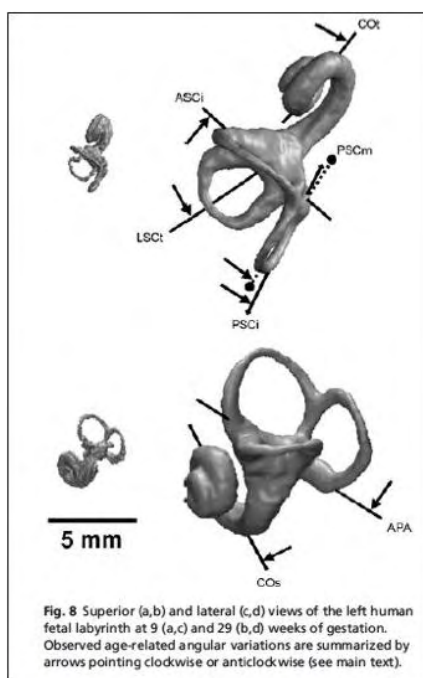
D'après Aoki (2012) : Orientation des CSC (SP= plan sagittal, HC= CSCL, AC= CSCA, PC= CSCP)

Angles entre CSC homolatéraux

Nous avons calculé des angles entre CSC homolatéraux proches de 90°. De nombreuses études se sont penchées sur les angulations entre CSC.

L'étude de Blanks et al (1975) est référente dans le positionnement tri-dimensionnelle des CSC par rapport au crâne. Ils ont utilisé pour cela le plan stéréotaxique de Reid (plancher des orbites et centre des CAE), ce qui a permis de calculer les angles des CSC entre eux (cf tableau) et par rapport à des repères crâniométriques : 25,12°±5,62 entre CSCL et plan horizontal, 49,32°±4,79 entre CSCA et plan frontal, 55,84°±3,95 entre CSCP et plan sagittal. Cette étude permettait d'optimiser le positionnement de la tête pour les tests de stimulation calorique.

Jeffery et Spoor (2004) ont étudié en IRM 41 fœtus humains (de 9 à 29 SA) qu'ils ont comparé à 54 adultes. La taille adulte des CSC est atteinte vers 18-19 SA mais la torsion et l'orientation des CSC continuent à évoluer légèrement avec l'âge gestationnel jusqu'à 29 SA. Les auteurs notent une ouverture de l'angle CSCA-CSCP, une sagitalisation du CSCL, et une variation de la torsion des CSC (cf image suivante). Ils rattachent ces modifications au fait que le labyrinthe est influencé par les modifications du crâne (coronalisation des rochers de 15° et aplatissement de la base de 15-20°) elles-mêmes en rapport avec la croissance cérébrale. La spirale cochléaire se « coronaliserait » avec les rochers, l'ensemble du labyrinthe basculant en antéro-inférieur compensant la rétroflexion de la partie postérieure de la base, et le CSCL s'abaisserait par rapport à la partie antérieure de la base. Ceci indique que les modifications crânielles affectent de façon dissociée le labyrinthe.



D'après Jeffery (2004) : Vues supérieure et latérale d'un labyrinthe foetal humain à 29 SA. Les

flèches indiquent le sens de la modification des plans des composants cochléo-vestibulaires durant le développement fœtal entre 9 et 29 SA.

Hashimoto (2005) sur des coupes histologiques photographiées de 7 os temporaux a défini les plans des CSC à partir de 3 points. Il a calculé les angles entre les plans et modélisés en 3D les canaux osseux et membraneux. Il a également mesuré le positionnement des CSC selon le plan de Reid.

Dans une étude IRM sur 11 patients, Aoki et al (2012) ont mesuré des angles de 91.0° à 94.9° entre CSC homolatéraux. Lee et al (2013) ont étudié les CSC à partir de 40 os pétreux en microCT (et reconstruction informatique 3D). Ils trouvent des angles entre 84) et 92°. Ils confirment l'aspect de cercle légèrement distordu à l'intérieur des CSC ainsi que la plus grande taille du CSCA et la plus petite du CSCL.

Tableau: Angles formés entre eux par les CSC homolatéraux chez les humains dans la littérature (la valeur entre parenthèses est la déviation standard)

Auteur Date	Technique	Population	CSCL-CSCA	CSCL-CSCP	CSCA-CSCP
Blanks 1975	Section	10 adultes	111,76° (7,55)	95,75° (4,66)	86,16° (4,72)
Sato 1993	Section	10 (5 mois à 76 ans)	78,7° * 92,6° **	87,3° * 90,9° **	107,9° * 95,8° **
Hashimoto 2005	Section	7 adultes	90,50° (2,98)	94,52° (3,32)	91,70° (1,85)
Della Santina 2005	TDM	22 adultes	90,6° (6,2)	90,4° (4,9)	94,0° (4,0)
Cox & Jeffery 2008	IRM	6 adultes	85,30° (5,81)	88,96° (6,33)	97,14° (4,82)
Bradshaw 2010	TDM	20 adultes	85,6° (4,4)	89,6° (5,2)	91,6° (3,4)
Aoki 2012	IRM	11 adultes	91,5° (6,7)	91,0° (4,9)	94,9° (3,8)
Lee 2013	Micro-TDM	23 adultes	84,4°	86,2°	92,1°
Jeffery 2004	IRM	41 foetus	-	-	98,1° (6,0)
Notre étude	TDM	54 foetus	88,67° (7,63)	92,60° (6,57)	90,19° (6,99)

* "standard planes" selon Sato et al.

** "torsion planes" selon Sato et al.

Ainsi, nos mesures angulaires, variant de 88° à 92° rejoignent les données de la littérature en faveur d'une « globale » orthogonalité des CSC entre eux. Hormis l'étude classique de Blanks, la plupart des autres études (cf tableau ci-dessus) ont constaté des valeurs moyennes angulaires fluctuant autour de 90° chez l'humain. Ceci laisse à penser que l'hypothèse d'une proche orthogonalité se vérifie. Mais ce fait n'écarte pas 2 choses :

-que les CSC présentent une légère torsion

-que les écarts physiologiques peuvent être grands (nous avons ainsi mesuré le plus petit angle à 59° et le plus grand à 110°).

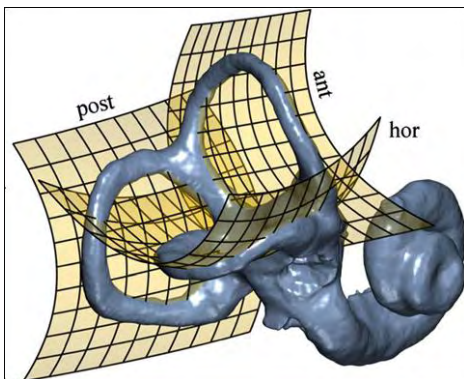
Des études se sont attachées à comparer les angles inter-CSC chez différentes espèces animales. Berlin et al (2013) ont étudié par TDM 39 espèces de mammifères de 11 ordres différents et ont constaté des angles moyens de 84,49+-7,33° entre CSCL et CSCA, de 91,87+-8,14° entre CSCP et CSCA et de 90,32+-5,91° entre CSCP et CSCL. Aucune espèce n'a des angles strictement orthogonaux. Cox et Jeffery (2010) ont réuni les données IRM des CSC de 120 spécimens appartenant à 58 espèces de mammifères. Ils n'ont pas constaté de corrélation entre le degré de torsion et la taille corporelle. Le CSCA est généralement plus large, tandis que le rayon est corrélé avec l'agilité des espèces (notamment celui du CSCL).

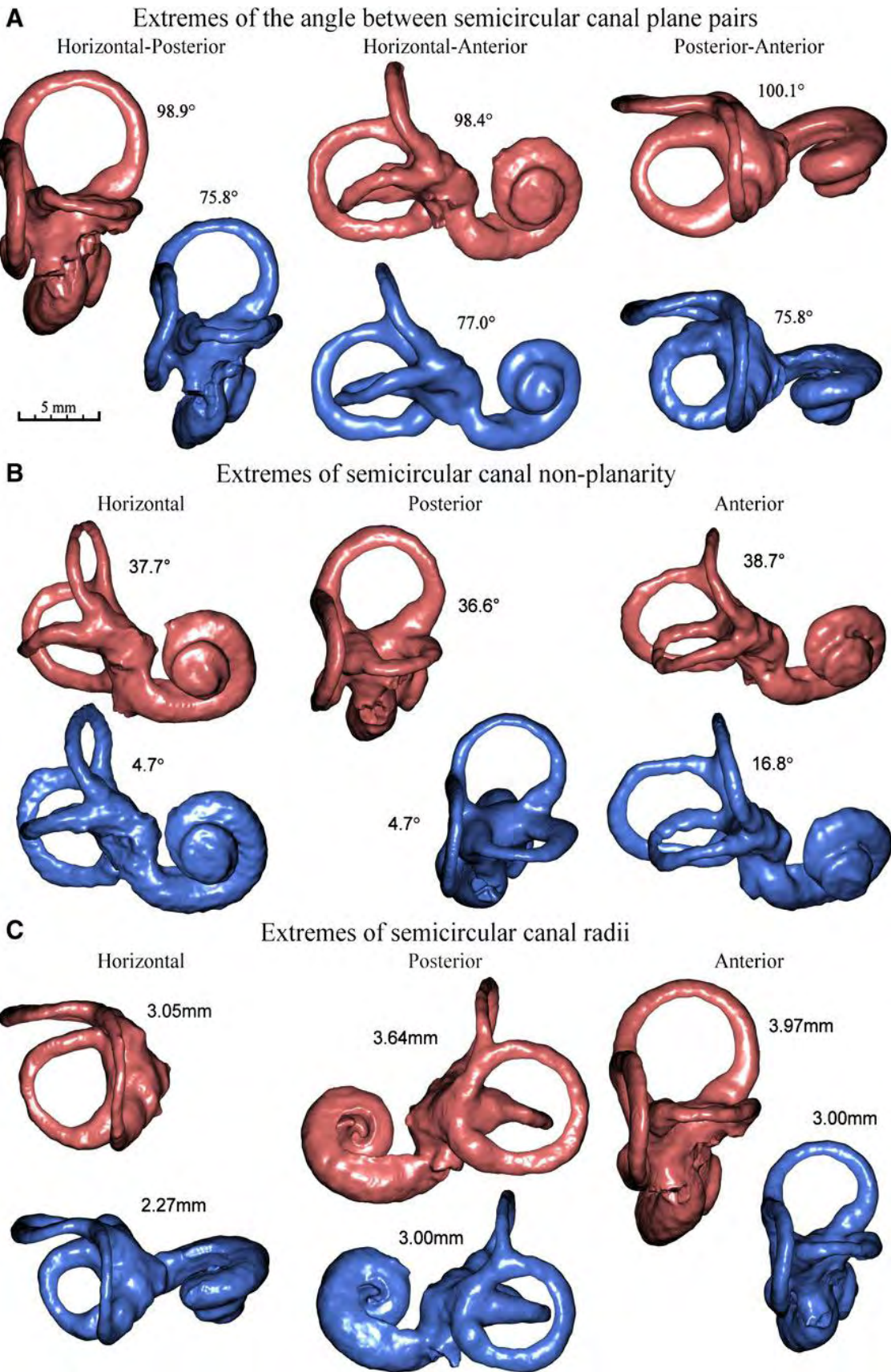
Jeffery et Spoor (2006) ont étudié par IRM le rapport entre fossa subarcuata et les CSC chez des fœtus de 3 espèces (H. sapiens, Macaca, Alouatta). L'arc des CSC étant un bon indicateur de l'agilité locomotrice des espèces. La fossa subarcuata est une cavité, située dans l'arc du CSCA, remplie chez des mammifères par le lobule pétrosal du paraflocculus cérébelleux (les 2 structures ayant un rôle fonctionnel dans la coordination oculaire réflexe). Chez les grands singes et l'humain, en l'absence de lobule pétrosal, cette cavité est vide chez le fœtus et s'ossifie en ne laissant qu'un vestige, le canal péto-mastoïdien. Ils ont constaté une corrélation entre la croissance des CSC, le volume de la fossa et l'âge gestationnel. La fossa se développe par résorption du cartilage situé au centre de l'arc du CSCA plus que par le développement du lobule pétrosal. Puis chez l'humain, l'ossification a lieu des bords vers le centre jusqu'à combler la fossa. Si cette corrélation dans la croissance existe, il n'y a probablement pas de lien de causalité chez l'humain. La même équipe (Jeffery 2008) a prolongé ce travail chez l'adulte en étudiant par TDM 167 spécimens de 68 espèces de primates. Ils ont constaté une corrélation entre le volume de la fossa subarcuata et le volume des CSC, entre le volume de la fossa et le rayon du CSCA, entre l'agilité des espèces et le diamètre des CSCP et CSCL. Ils concluent que ce sont les fonctions locomotrices qui modèlent la morphologie des CSC, et que la fossa subarcuata ne prend la place dans l'espace entre les CSC que de façon passive.

Planarité des CSC

Un degré de torsion existe dans les 3 CSC (Sato, Bradshaw). Même faible, cette torsion exclue une stricte planarité et explique partiellement (avec les différences méthodologiques) les écarts angulaires constatés dans la littérature. Ainsi, en définissant un plan par 3 points, l'angle sera différent chez un même sujet en fonction du placement des landmarks dans la lumière des CSC; si le Landmark de l'apex pose peu de difficulté pour son placement, il en est différemment au niveau de la base des CSC (notamment avec l'ampoule). Dans une étude histologique sur 10 os temporaux (de 5 mois à 76 ans), Sato et al ont modélisé les CSC. Ils ont calculé un degré de torsion moyen de $16,4^\circ$ pour le CSCL, de $9,5^\circ$ pour le CSCA et de $8,5^\circ$ pour le CSCP. Ainsi, le CSCA déviait le plus avec un degré moyen de $16,4^\circ$, tandis que le CSCL variait le plus (entre $0,8^\circ$ et $21,4^\circ$). Ils ont prouvé que cette torsion était responsable des différences d'angulation entre CSC rapportés dans la littérature, puisque cette angulation différait en fonction du plan choisi (par définition arbitraire). Ils ont émis l'hypothèse que, dans la mesure où l'orthogonalité entre CSC représentait le fonctionnement vestibulaire optimal, la torsion des CSC était une adaptation tendant à se rapprocher de l'orthogonalité.

Bradshaw et al (2010) ont développé des modèles mathématiques à partir d'une segmentation semi-automatique TDM de 34 oreilles. Ils ont mesuré les angles entre les plans canaux (cf tableau), la courbure de ces plans canaux et le rayon de courbure des CSC. Cela leur permis d'expliquer les différences de résultats entre différentes études, qu'ils attribuent à des modélisations mathématiques différentes. Le sens des courbures des plans des CSC (et donc leur non-planarité) est représenté dans l'illustration suivante.





D'après Bradshaw : Ecart maximaux des angles, torsion et rayons des CSC

CSC synergistiques

L'alignement entre CSCA et CSCP controlatéraux et l'angulation entre CSCL controlatéraux ont fait l'objet de plusieurs études.

Tableau: Angles formés entre CSC synergistiques chez les humains dans la littérature

Auteur	Technique	CSCA/ CSCP control	CSCL D/G
Aoki	IRM	17,2-19,0°	9,8°
Blanks	Dissection, stéréotaxie	23-24°	19,82°
Della Santina	TDM, stéréotaxie	15,3°	11,3°
Bradshaw	Modèle mathématique	15-16°	11,7°

Chez l'humain, Aoki et al (2012) ont mesuré les angles entre CSC par rapport aux plans crâniens. Le CSCL est quasi orthogonal à un plan sagittal, quel que soit l'orientation de l'os pétreux (généralement oblique vers le bas). Les canaux antérieur et postérieur forment des angles respectivement de $\approx 35^\circ$ et $\approx 50^\circ$ par rapport au plan sagittal médian. Hashimoto et al (2005) ont mesuré un angle de $25,40^\circ$ entre le CSCL et le plan crânial horizontal (de Reid), de $61,24^\circ$ entre le CSCA et le plan frontal et de $54,59^\circ$ entre le CSCP et le plan sagittal.

Berlin et al (2013) ont mesuré les angles synergistiques chez 39 espèces de mammifères (hors humain). Ils ont obtenu une moyenne de $9,52^\circ \pm 5,19$ entre CSCA et CSCP synergistiques et de $11,22^\circ \pm 7,51$ entre CSCL synergistiques.

Symétrie droite-gauche

Della Santina et al n'ont pas constaté de différence des angles inter-CSC entre côtés droit et gauche. De même, Lee et al (2013) n'ont pas trouvé de différence droite-gauche, ni entre sexe (à l'exception d'une mesure).

Cette symétrie des angles inter-CSC a également été montrée chez l'animal (Welker) et s'explique sans doute par la nécessité fonctionnelle dans la locomotion ; un côté ne pouvant être favorisé par rapport à l'autre.

3) Positionnement du vestibule par rapport au rocher :

Dans notre étude, nous avons mesuré l'évolution de l'ossification pétreuse et nous constatons, sans surprise, une très forte corrélation avec l'âge. La croissance du rocher, in utero, est bien corrélée à l'âge et a fait l'objet de la publication de tables de croissance (Scheuer).

Age (semaines)	Pars petrosa Longueur maximale (en mm)
16	10,5
18	12,3
20	14,4
22	17,3
24	18,8
26	19,9
28	21,4
30	22,5
32	27,7
34	29,7
36	33,0
38	35,1
40	38,1

D'après Scheuer, adapté de Fazekas et Kosa (1978)

Odeh a étudié le rocher en échographie transvaginale chez 34 femmes entre 14 et 16 SA. L'os pétreux était visible dans tous les cas avec un diamètre antéro-postérieur moyen à cet âge de 4,59 mm.

L'os temporal est souvent préservé lorsqu'un organisme subit une décomposition. Ainsi, d'autres composants de l'os temporal ont été étudiés pour déterminer l'âge pédiatrique. Ainsi le plancher tympanique peut être utile bien qu'il n'apporte qu'un âge approximatif (Weaver).

Eby et Nadol (1986) ont étudié la croissance mastoïdienne grâce à 253 radiographies crâniennes d'enfants et 42 d'adultes. Ils n'ont pas constaté de différence droite-gauche mais ont constaté un double pic de croissance : 0-7 ans puis 9-15 ans chez les filles et 11-19 ans chez les garçons. Quant à la pneumatisation de l'os temporal, elle n'est visible qu'après la naissance (Virapongse). L'air remplit plusieurs fonctions : Dissipation acoustique, allègement du crâne, réservoir d'air, réception sonore. L'apex pétreux est pneumatisé dans environ 1/3 des cas. La pneumatisation se développe en 3 étapes : de 0-2 ans, de 2-5 ans et plus tard. Il n'y a pas de différence entre les sexes et il y a un haut degré de symétrie droite-gauche.

D'après Veillon et al (volume 5), la pneumatization du rocher est terminée vers 7-8 ans.

Positionnement du vestibule :

Peu d'études à notre connaissance, ce sont intéressées au positionnement du vestibule pendant la croissance du rocher. Nos résultats révèlent une stabilité du centre du vestibule (de 22 à 40 SA) par rapport à la forme osseuse triangulaire 2D du rocher. Il faut noter que si le centre du vestibule est un repère anatomique objectif, les 3 pointes du rocher n'ont été définies que par rapport au plan du CSCL et ne représentent donc pas des repères anatomiques pétreux reproductibles.

Pourtant, le rocher subit une croissance en taille laquelle s'accompagne d'une modification de position avec une coronalisation d'environ 15° qui survient avant la naissance (Jeffery 2002, Jeffery 2004). L'étude du positionnement du vestibule dans le rocher nécessite donc de prendre en compte ces 2 phénomènes de croissance en taille et de repositionnement. Cette stabilité est alors d'autant plus remarquable et témoigne d'une probable programmation génétique.

Pour étudier le positionnement centro-vestibulaire pendant la croissance du rocher, nous avons réalisé une analyse procrustes. L'analyse procrustes, ou morphométrie géométrique, est un outil statistique développé dans les années 1990 qui permet d'étudier une forme en s'affranchissant du critère de taille. Elle procède de superposition et de mise à l'échelle de l'objet étudié (Bookstein 1991, Slice). Elle s'effectue à partir de landmarks ou points-repères reconnaissables en 2D ou 3D sur les objets étudiés. Ces points-repères ont été définis par Bookstein de 3 types : I lorsqu'ils sont parfaitement définis, reproductibles entre individus; II lorsqu'ils sont définis par des structures spécifiques mais dont la reproductibilité entre individus ne l'est pas (par exemple, position dans une courbe) ; III si ils ne sont pas définis par des structures spécifiques avec une faible reproductibilité inter-individuelle (par exemple extrême par rapport à un autre point). Les coordonnées tridimensionnelles des landmarks sont ramenées à la même échelle puis le paramètre de taille individuelle ou « taille centroïde » est extrait (Faruch). La « taille centroïde » est mathématiquement indépendante de la conformation. Puis une superposition procrustes, consistant en 3 transformations géométriques (translation, normalisation taille, rotation), est réalisée. Après la superposition, une conformation moyenne est obtenue avec des « résidus procrustes » qui sont des variables de conformation (Faruch).

L'analyse statistique en Composante Principale (ACP) des résidus procrustes est alors réalisée. Elle permet de distinguer des groupes au sein d'une population et donc une structure. Les résultats statistiques sont reproduits sous forme d'une représentation graphique qui est une superposition des schémas des formes moyennes.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons étudié l'OI sur le plus large échantillon de fœtus humains (153) jamais présenté dans la littérature (toutes méthodes confondues). Ceci a été permis grâce à la tomodensitométrie qui présente pour avantage majeur de ne pas nécessiter de dégradation de l'organe étudié, et donc d'obtenir des mesures plus fiables car obtenues sur de larges échantillons.

Cette étude nous permet de tirer plusieurs conclusions :

- Dès 21 SA, la plupart des dimensions cochléo-vestibulaires standards ont atteint une taille adulte. Dans la littérature, l'âge le plus précoce décrit auquel l'OI atteindrait sa taille adulte est de 18 SA (Richard). On peut donc en supposer que l'âge adulte est atteint entre 18 et 21 SA. Ceci en fait une exception unique dans l'organisme humain. L'îlot osseux du CSCL atteint la taille adulte à 25 SA.
- Certaines dimensions de l'OI (aqueduc de la cochlée, CAI) croissent avec l'âge. Cette croissance fœtale s'inscrit dans un continuum puisqu'elle se prolonge après la naissance.
- Les CSC atteignent leur morphologie tri-dimensionnelle adulte dès 22 SA. Ils présentent entre eux une angulation moyenne proche de 90°, mais ces mesures peuvent varier grandement de façon physiologique.
- Lors de la croissance fœtale du rocher, le centre du vestibule est remarquablement stable dans son positionnement par rapport aux 3 angles du « triangle » pétreux.

Notre étude serait utilement complétée par des travaux concernant les nouveaux-nés et nourrissons, population rarement explorée dans la littérature.

Si l'OI est maintenant bien connue, son étude chez l'être vivant reste un challenge de par son anatomie complexe et surtout de par sa taille réduite. L'imagerie en coupes a pris une importance considérable dans l'exploration diagnostique et pré-thérapeutique des pathologies de l'audition et de l'équilibre. L'IRM, grâce aux dispositifs 3 Tesla, permet d'étudier finement l'anatomie du labyrinthe membraneux. Des perspectives d'évolution sont raisonnablement permises avec l'avènement de dispositifs 7 Teslas. La tomodensitométrie, bien qu'irradiante, reste incontournable pour l'étude du labyrinthe osseux.

VIII REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adalian P, Piercecchi-Marti MD, Bourliere-Najean B, Panuel M, Fredouille C, Dutour O, Leonetti G. Postmortem assessment of fetal diaphyseal femoral length: validation of a radiographic methodology. *J Forensic Sci.* 2001 Mar;46(2):215-9.
- Ala Eddine C, Williams M, Ayache D. Useful imaging of the ear. *J Radiol.* 2006 Nov;87 (11 Pt 2):1728-42.
- Aoki S, Takei Y, Suzuki K, Masukawa A, Arai Y. Planer orientation of the bilateral semicircular canals in dizzy patients. *Auris Nasus Larynx.* 2012 39(5): 451-454.
- Arnold WH, Lang T. Development of the membranous labyrinth of human embryos and fetuses using computer aided 3D-reconstruction. *Ann Anat.* 2001 Jan;183(1):61-6.
- Bachor E, Byahatti S, Karmody CS. New aspects in the histopathology of the cochlear aqueduct in children. *Am J Otol.* 1999 Sep;20(5):612-20.
- Bachor E, Byahatti S, Karmody CS. The cochlear aqueduct in pediatric temporal bones. *Eur Arch Otorhinolaryngol.* 1997;254 Suppl 1:S34-8.
- Bamiou DE, Phelps P, Sirimanna T. Temporal bone computed tomography findings in bilateral sensorineural hearing loss. *Arch Dis Child.* 2000 Mar;82(3):257-60.
- Berlin JC, Kirk EC, Rowe TB. Functional implications of ubiquitous semicircular canal non-orthogonality in mammals. *PLoS One.* 2013 Nov 19;8(11):e79585.
- Blanks RH, Curthoys IS, Markham CH. Planear relationship of the semicircular canals in man. *Acta Otolaryngol.* 1975 80: 185-196.
- Bonaldi LV, do Lago A, Crema LC, Fukuda Y, Smith RL. Internal auditory canal: pre- and postnatal growth. *J Otolaryngol.* 2004 Aug;33(4):243-7.
- Bonaldi LV, De Angelis MA, Smith RL. Developmental study of the round window region. *Acta Anat (Basel).* 1997;159(1):25-9.
- Bookstein FL. *Morphometric Tools for Landmark Data: Geometry and Biology.* Cambridge University Press, 1991.
- Bowden RE. Development of the middle and external ear in man. *Proc R Soc Med.* 1977 Nov;70(11):807-15.
- Bradshaw AP, Curthoys IS, Todd MJ, Magnussen JS, Taubman DS, et al. A mathematical model of human semicircular canal geometry: a basis for interpreting vestibular physiology. *J Assoc Res Otolaryngol.* 2010 11: 145-159.
- Carey J, Amin N. Evolutionary changes in the cochlea and labyrinth: Solving the problem of

sound transmission to the balance organs of the inner ear. *Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol.* 2006 Apr;288(4):482-9. Review.

- Casselman JW, Offeciers EF, De Foer B, Govaerts P, Kuhweide R, Somers T. CT and MR imaging of congenital abnormalities of the inner ear and internal auditory canal. *Eur J Radiol.* 2001 Nov;40(2):94-104. Review.

- Chadwell JB, Halsted MJ, Choo DI, Greinwald JH, Benton C. The cochlear cleft. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2004 Jan;25(1):21-4.

- Chen JL, Gittleman A, Barnes PD, Chang KW. Utility of temporal bone computed tomographic measurements in the evaluation of inner ear malformations. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg.* 2008 Jan;134(1):50-6.

- Cox PG, Jeffery N. Geometry of the semicircular canals and extraocular muscles in rodents, lagomorphs, felids and modern humans. *J Anat.* 2008 Nov;213(5):583-96.

- Cox PG, Jeffery N. Semicircular canals and agility: the influence of size and shape measures. *J Anat.* 2010 Jan;216(1):37-47.

- Crubézy E, Braga J, Larrouy G. *Anthropobiologie. Abrégés, MASSON, Paris 2002.*

- Curthoys IS, Oman CM. Dimensions of the horizontal semicircular duct, ampulla and utricle in the human. *Acta Otolaryngol.* 1987 May-Jun;103(5-6):254-61.

- Daniels DL, Swartz JD, Harnsberger HR, Ulmer JL, Shaffer KA, Mark L. Anatomic Moment. Hearing, I: The cochlea. *AJNR Am J Neuroradiol.* 1996 Aug;17(7):1237-41.

- Declau F, Jacob W, Dorrine W, Appel B, Marquet J. Early ossification within the human fetal otic capsule: morphological and microanalytical findings. *J Laryngol Otol.* 1989 Dec;103(12):1113-21.

- Della Santina CC, Potyagaylo V, Migliaccio AA, Minor LB, Carey JP. Orientation of human semicircular canals measured by three-dimensional multiplanar CT reconstruction. *J Assoc Res Otolaryngol.* 2005 Sep;6(3):191-206.

- Dulguerov Pavel, Remacle Marc. *Précis d'audiophonologie et de déglutition: Tome 1 – L'oreille et les voies de l'audition. Groupe de Boeck, 20 oct. 2005.*

- Eby TL, Nadol JB Jr. Postnatal growth of the human temporal bone. Implications for cochlear implants in children. *Ann Otol Rhinol Laryngol.* 1986 Jul-Aug;95(4 Pt 1):356-64.

- Ekdale EG. Comparative Anatomy of the Bony Labyrinth (Inner Ear) of Placental Mammals. *PLoS One.* 2013 Jun 21;8(6):e66624.

- El Khoury M, Braga J, Dumoncel J, Nancy J, Esclassan R, Vaysse F. The human semicircular

canals orientation is more similar to the bonobos than to the chimpanzees. *PLoS One*. 2014 Apr 7;9(4):e93824.

- Faruch Bilfeld Marie. Etude tomodensitométrique du dimorphisme sexuel de l'os coxal immature en géométrie morphométrique. Thèse de Médecine, Université Toulouse 3, 2011.

- Gulya A, Schuknecht H. Anatomy of the temporal bone with surgical implications. Third edition. CRC Press, 2007.

- Hashimoto S, Naganuma H, Tokumasu K, Itoh A, Okamoto M. Three-dimensional reconstruction of the human semicircular canals and measurement of each membranous canal plane defined by Reid's stereotactic coordinates. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 2005 114(12): 934-938.

- Ifediba MA, Rajguru SM, Hullar TE, Rabbitt RD. The role of 3-canal biomechanics in angular motion transduction by the human vestibular labyrinth. *Ann Biomed Eng*. 2007 Jul;35(7):1247-63.

- Jackler RK, Luxford WM, House WF. Congenital malformations of the inner ear: a classification based on embryogenesis. *Laryngoscope*. 1987 Mar;97(3 Pt 2 Suppl 40):2-14.

- Jeffery N, Spoor F. Brain size and the human cranial base: a prenatal perspective. *Am J Phys Anthropol*. 2002 Aug;118(4):324-40.

- Jeffery N, Spoor F. The primate subarcuate fossa and its relationship to the semicircular canals part I: prenatal growth. *J Hum Evol*. 2006 Nov;51(5):537-49.

- Jeffery N, Spoor F. Prenatal growth and development of the modern human labyrinth. *J Anat*. 2004 Feb;204(2):71-92.

- Jeffery N, Ryan TM, Spoor F. The primate subarcuate fossa and its relationship to the semicircular canals part II: adult interspecific variation. *J Hum Evol*. 2008 Aug;55(2):326-39.

- Kirk EC, Gosselin-Ildari AD. Cochlear labyrinth volume and hearing abilities in primates. *Anat Rec (Hoboken)*. 2009 Jun;292(6):765-76.

- Kodama A, Sando I. Postnatal development of the vestibular aqueduct and endolymphatic sac. *Ann Otol Rhinol Laryngol Suppl*. 1982 Jul-Aug;96:3-12.

- Kodama A, Sando I. Dimensional anatomy of the vestibular aqueduct and the endolymphatic sac (rugose portion) in human temporal bones. Statistical analysis of 79 bones. *Ann Otol Rhinol Laryngol Suppl*. 1982 Jul-Aug;96:13-20.

- Krombach GA, van den Boom M, Di Martino E, Schmitz-Rode T, Westhofen M, Prescher A, Günther RW, Wildberger JE. Computed tomography of the inner ear: size of anatomical structures in the normal temporal bone and in the temporal bone of patients with Menière's

disease. *Eur Radiol.* 2005 Aug;15(8):1505-13. Epub 2005 Apr 12.

- Lan MY, Shiao JY, Ho CY, Hung HC. Measurements of normal inner ear on computed tomography in children with congenital sensorineural hearing loss. *Eur Arch Otorhinolaryngol.* 2009 Sep;266(9):1361-4.

- Lane JJ, Witte RJ, Henson OW, Driscoll CL, Camp J, Robb RA. Imaging microscopy of the middle and inner ear: Part II: MR microscopy. *Clin Anat.* 2005 Sep;18(6):409-15.

- Lane JJ, Witte RJ, Driscoll CL, Camp JJ, Robb RA. Imaging microscopy of the middle and inner ear: Part I: CT microscopy. *Clin Anat.* 2004 Nov;17(8):607-12.

- Lane JJ, Lindell EP, Witte RJ, DeLone DR, Driscoll CL. Middle and inner ear: improved depiction with multiplanar reconstruction of volumetric CT data. *Radiographics.* 2006 Jan-Feb;26(1):115-24.

- Larsen William. *Embryologie humaine.* De Boeck 2^e édition française, 15 mars 2003.

- Lee JY, Shin KJ, Kim JN, Yoo JY, Song WC, Koh KS. A morphometric study of the semicircular canals using micro-CT images in three-dimensional reconstruction. *Anat Rec (Hoboken).* 2013 May;296(5):834-9.

- Lemmerling M, Vanzielegem B, Dhooge I, Van Cauwenberge P, Kunnen M. CT and MRI of the semicircular canals in the normal and diseased temporal bone. *Eur Radiol.* 2001;11(7):1210-9.

- Lo WW. Imaging of cochlear and auditory brain stem implantation. *AJNR Am J Neuroradiol.* 1998 Jun-Jul;19(6):1147-54.

- Mafong DD, Shin EJ, Lalwani AK. Use of laboratory evaluation and radiologic imaging in the diagnostic evaluation of children with sensorineural hearing loss. *Laryngoscope.* 2002 Jan;112(1):1-7.

- Maher N, Becker H, Laszig R. [Quantification of relevant measurements of the petrous bone with computerized tomography before cochlear implant operation]. *Laryngorhinootologie.* 1995 Jun;74(6):337-42.

- Malinzak MD, Kay RF, Hullar TE. Locomotor head movements and semicircular canal morphology in primates. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2012 Oct 30;109(44):17914-9.

- Marcus S, Whitlow CT, Koonce J, Zapadka ME, Chen MY, Williams DW 3rd, Lewis M, Evans AK. Computed tomography supports histopathologic evidence of vestibulocochlear sexual dimorphism. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol.* 2013 Jul;77(7):1118-22.

- Marugán-Lobón J, Chiappe LM, Farke AA. The variability of inner ear orientation in saurischian dinosaurs: testing the use of semicircular canals as a reference system for

comparative anatomy. PeerJ. 2013 Aug 6;1:e124.

- Melhem ER, Shakir H, Bakthavachalam S, MacDonald CB, Gira J, Caruthers SD, Jara H. Inner Ear Volumetric Measurements Using High-Resolution 3D T2-Weighted Fast Spin-Echo MR Imaging: Initial Experience in Healthy Subjects. *AJNR Am J Neuroradiol* 19:1819–1822, November 1998.

- Michaels L, Soucek S, Linthicum F. The intravestibular source of the vestibular aqueduct: Its structure and pathology in Ménière's disease. *Acta Otolaryngol.* 2009 Jun;129(6):592-601.

- Michaels L, Soucek S, Linthicum F. The intravestibular source of the vestibular aqueduct. II: its structure and function clarified by a developmental study of the intra-skeletal channels of the otic capsule. *Acta Otolaryngol.* 2010 Apr;130(4):420-8.

- Minier M, Maret D, Dedouit F, Vergnault M, Mokrane FZ, Rousseau H, Adalian P, Telmon N, Rougé D. Fetal age estimation using MSCT scans of deciduous tooth germs. *Int J Legal Med.* 2013 Jul 5.

- Mokrane FZ, Dedouit F, Gellée S, Sans N, Rousseau H, Rougé D, Telmon N. Sexual dimorphism of the fetal ilium: a 3D geometric morphometric approach with multislice computed tomography. *J Forensic Sci.* 2013 Jul;58(4):851-8.

- Mori MC, Chang KW. CT analysis demonstrates that cochlear height does not change with age. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2012 Jan;33(1):119-23.

- Moser T, Veillon F, Sick H, Riehm S. The hypodense focus in the petrous apex: a potential pitfall on multidetector CT imaging of the temporal bone. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2008 Jan;29(1):35-9.

- Nemzek WR, Brodie HA, Chong BW, Babcook CJ, Hecht ST, Salamat S, Ellis WG, Seibert JA. Imaging findings of the developing temporal bone in fetal specimens. *AJNR Am J Neuroradiol.* 1996 Sep;17(8):1467-77.

- Nemzek WR, Brodie HA, Hecht ST, Chong BW, Babcook CJ, Seibert JA. MR, CT, and plain film imaging of the developing skull base in fetal specimens. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2000 Oct;21(9):1699-706.

- Noble JH, Labadie RF, Majdani O, Dawant BM. Automatic segmentation of intracochlear anatomy in conventional CT. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2011 Sep;58(9):2625-32.

- Odeh M, Ophir E, Bornstein J. The petrous portion of the temporal bone can be demonstrated by transvaginal ultrasound at 14-16 weeks of gestation. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2010 Nov;36(5):645-6.

- Ozgen B, Oguz KK, Atas A, Sennaroglu L. Complete labyrinthine aplasia: clinical and radiologic findings with review of the literature. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2009 Apr;30(4):774-

80.

- Pappas DG, Simpson LC, McKenzie RA, Royal S. High-resolution computed tomography: determination of the cause of pediatric sensorineural hearing loss. *Laryngoscope*. 1990 Jun;100(6):564-9.
- Pekkola J, Pitkaranta A, Jappel A, Czerny C, Baumgartner WD, Heliovaara M, Robinson S. Localized pericochlear hypoattenuating foci at temporal-bone thin-section CT in pediatric patients: nonpathologic differential diagnostic entity? *Radiology*. 2004 Jan;230(1):88-92.
- Phillips RR, Phelps PD. Imaging in congenital deafness. *Arch Dis Child*. 1991 Dec;66(12):1372-4.
- Porowski L, Radziemski A, Piotrowski A, Skórzewska A, Wozniak W. The foetal development of the human osseous labyrinth in a computed tomographic study. *Folia Morphol (Warsz)*. 2003;62(3):281-3.
- Pujol R, Lavigne-Rebillard M, Uziel A. Development of the human cochlea. *Acta Otolaryngol Suppl*. 1991;482:7-12; discussion 13. Review.
- Purcell D, Johnson J, Fischbein N, Lalwani AK. Establishment of normative cochlear and vestibular measurements to aid in the diagnosis of inner ear malformations. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 2003 Jan;128(1):78-87.
- Purcell DD, Fischbein N, Lalwani AK. Identification of previously "undetectable" abnormalities of the bony labyrinth with computed tomography measurement. *Laryngoscope*. 2003 Nov;113(11):1908-11.
- Purcell DD, Fischbein NJ, Patel A, Johnson J, Lalwani AK. Two temporal bone computed tomography measurements increase recognition of malformations and predict sensorineural hearing loss. *Laryngoscope*. 2006 Aug;116(8):1439-46.
- Pyle GM. Embryological development and large vestibular aqueduct syndrome. *Laryngoscope*. 2000 Nov;110(11):1837-42.
- Richard C, Laroche N, Malaval L, Dumollard JM, Martin Ch, Peoch M, Vico L, Prades JM. New insight into the bony labyrinth: a microcomputed tomography study. *Auris Nasus Larynx*. 2010 Apr;37(2):155-61.
- Ricciardelli EJ. Embryology and anatomy of the cranial base. *Clin Plast Surg*. 1995 Jul;22(3):361-72.
- Sakashita T, Sando I. Postnatal development of the internal auditory canal studied by computer-aided three-dimensional reconstruction and measurement. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 1995 Jun;104(6):469-75.

- Sando I, Orita Y, Miura M, Balaban CD. Vestibular abnormalities in congenital disorders. *Ann N Y Acad Sci.* 2001 Oct; 942:15-24.
- Sato H, Sando I, Takahashi H. Sexual dimorphism and development of the human cochlea. Computer 3-D measurement. *Acta Otolaryngol.* 1991;111(6):1037-40.
- Sato H, Sando I, Takahashi H. Computer-aided three-dimensional measurement of the human vestibular apparatus. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 1992 Sep;107(3):405-9.
- Sato H, Sando I, Takahashi H, Fujita S. Torsion of the human semicircular canals and its influence on their angular relationships. *Acta Otolaryngol.* 1993 Mar;113(2):171-5.
- Scheuer L, Black S. *Developmental juvenile osteology.* Academic Press, 2000.
- Schulz-Mirbach T, Heß M, Metscher BD, Ladich F. A unique swim bladder-inner ear connection in a teleost fish revealed by a combined high-resolution microtomographic and three-dimensional histological study. *BMC Biol.* 2013 Jul 4;11:75.
- Sennaroglu L, Saatci I. A new classification for cochleovestibular malformations. *Laryngoscope.* 2002 Dec;112(12):2230-41.
- Shin KJ, Lee JY, Kim JN, Yoo JY, Shin C, Song WC, Koh KS. Quantitative analysis of the cochlea using three-dimensional reconstruction based on microcomputed tomographic images. *Anat Rec (Hoboken).* 2013 Jul;296(7):1083-8.
- Slice DE. Landmark coordinates aligned by procrustes analysis do not lie in Kendall's shape space. *Syst Biol.* 2001 Feb;50(1):141-9.
- Spector GJ, Lee D, Carr C, Davis G, Schnettgoecke V, Strauss M, Rauchbach E. Later stages of development of the periotic duct and its adjacent area in the human fetus. *Laryngoscope.* 1980 May;90(5 Pt 2):1-31.
- Spoor F, Zonneveld F. Comparative review of the human bony labyrinth. *Am J Phys Anthropol.* 1998
- Spoor F, Zonneveld F. Morphometry of the primate bony labyrinth: a new method based on high-resolution computed tomography. *J Anat.* 1995 Apr;186 (Pt 2):271-86.
- Spoor F, Hublin JJ, Braun M, Zonneveld F. The bony labyrinth of Neanderthals. *J Hum Evol.* 2003 Feb;44(2):141-65.
- Stjernholm C, Muren C. Dimensions of the cochlear nerve canal: a radioanatomic investigation. *Acta Otolaryngol.* 2002 Jan;122(1):43-8.
- Swartz JD, Daniels DL, Harnsberger HR, Shaffer KA, Mark L. The temporal bone. *AJNR Am J Neuroradiol.* 1996 Jan;17(1):201-4.

- Swartz JD, Daniels DL, Harnsberger HR, Shaffer KA, Mark L. Balance and equilibrium, I: The vestibule and semicircular canals. *AJNR Am J Neuroradiol.* 1996 Jan;17(1):17-21.
- Teissier N, Van Den Abbeele T, Sebag G, Elmaleh-Berges M. Computed Tomography measurements of the normal and the pathologic cochlea in children. *Pediatr Radiol.* 2010 Mar;40(3):275-83.
- Veillon Francis. *Imagerie de l'oreille et de l'os temporal : Volume 1. Anatomie et imagerie normales.* Librairie Lavoisier, Coll. Imagerie médicale. 2013
- Veillon Francis. *Imagerie de l'oreille et de l'os temporal : Volume 5. Pédiatrie.* Librairie Lavoisier, Coll. Imagerie médicale. 2013
- Virapongse C, Sarwar M, Bhimani S, Sasaki C, Shapiro R. Computed tomography of temporal bone pneumatization: 1. Normal pattern and morphology. *AJR Am J Roentgenol.* 1985 Sep;145(3):473-81.
- Weaver DS. Application of the likelihood ratio test to age estimation using the infant and child temporal bone. *Am J Phys Anthropol.* 1979 Feb;50(2):263-9.
- Welker KL, Orkin JD, Ryan TM. Analysis of intraindividual and intraspecific variation in semicircular canal dimensions using high-resolution x-ray computed tomography. *J Anat.* 2009 Oct;215(4):444-51.
- West CD. The relationship of the spiral turns of the cochlea and the length of the basilar membrane to the range of audible frequencies in ground dwelling mammals. *J Acoust Soc Am.* 1985 Mar;77(3):1091-101.
- Yokoyama T, Iino Y, Kakizaki K, Murakami Y. Human temporal bone study on the postnatal ossification process of auditory ossicles. *Laryngoscope.* 1999 Jun;109(6):927-30.

RESUME

Objectifs :

Etudier le développement osseux de l'oreille interne chez le fœtus humain.

Matériel et Méthode :

Notre institution dispose d'une banque de fœtus humains qui ont été étudiés par tomodensitométrie. Les images ont été exploitées grâce au logiciel Amira™. 13 dimensions cochléo-vestibulaires standards ont été mesurées chez 153 fœtus. L'angulation entre les 3 canaux semi-circulaires (CSC) et le positionnement du vestibule ont été étudiés chez 54 fœtus. L'analyse statistique a été réalisée grâce au logiciel R.

Résultats :

Il n'y a pas de dimorphisme sexuel, ni de différence droite-gauche dans les distances mesurées. 8 mesures cochléo-vestibulaires n'évoluent pas en taille de 21 à 40 SA. L'îlot osseux du CSC latéral croît jusqu'à 25 SA. L'aqueduc de la cochlée et le conduit auditif interne sont corrélés à l'âge foetal. L'angle entre les CSC est proche de 90°, malgré de larges écarts physiologiques, et n'évolue pas entre 21 et 40 SA. Il n'y a pas de dimorphisme sexuel. Le centre du vestibule est stable dans son positionnement anatomique au sein du rocher pendant le développement fœtal.

Conclusion :

Conformément aux données de la littérature, la croissance cochléo-vestibulaire se termine à 21 SA ou moins. Certains éléments de l'oreille interne croissent avec l'os pétreux et évoluent avec l'ossification du rocher. La stabilité du positionnement du vestibule dans le rocher évoque une détermination génétique forte. Notre série est quantitativement la plus importante jamais publiée dans la littérature.

ABSTRACT:

Objectives:

Our goal is to clarify the course of inner ear bony development in human fetuses.

Material and Methods:

Our institution hosts a collection of human fetuses from 21 to 40 WA that were CT scanned and studied with Amira™ software. We studied 13 measurements in the inner ear of 153 fetuses. We also studied semi-circular canals orientation and the vestibular ear positioning in petrous bone of 54 human fetuses. Statistical analysis was performed with R™ software.

Results:

We found no side-related differences or sexual dimorphism. 8 cochlear and vestibular bone measurements did not show growth from 21 to 40 WA and are similar to those of adults in literature. The lateral semicircular canal bony island grows until 25 WA. Internal auditory canal and cochlear aqueduct growth are correlated with gestational age.

Mean angles between the three semi-circular canals are close to orthogonality, despite important physiologic variations, and did not change significantly from 21 to 40 WA. There was no sexual dimorphism. The center of vestibular ear has a stable positioning within the three angles of petrous bone during fetal gestation.

Conclusions:

In accordance with literature, we confirm that the cochlea and semi-circular canals 3D configuration reaches their adult size at or before 21 WA. Some parts of the inner ear (cochlear aqueduct, IAC) continue to grow with petrous bone and evolve with its ossification. To the best of our knowledge, our series is the largest series of human fetal inner ear ever published.