



ROYAUME DU MAROC
UNIVERSITE MOHAMMED V
FACULTE DE MEDECINE ET DE PHARMACIE
-RABAT-

Etude morphologique des canaux semi-circulaires d'après une modélisation 3D de l'oreille interne

Mémoire de fin d'Etude

Présenté PAR

- **Dr Ismail Nakkabi**

POUR L'OBTENTION DU
DIPLOME DE SPECIALITE MEDICALE EN ORL et CCF

MOTS CLES : oreille interne, anatomie, modélisation 3D, canaux semi-circulaires

Directeur de spécialité :

- **Pr Mohammed Nouredine El Amine El Alami**



Avant-propos

Avant-propos

Le présent mémoire, intitulé « Etude morphologique des canaux semi-circulaires d'après une modélisation 3D de l'oreille interne » rentre dans le cadre de l'obtention du diplôme de spécialité médicale en ORL et CCF. A la différence d'autres études anatomiques par dissection sur cadavre, ce travail est le fruit d'une combinaison d'outils informatiques, d'imagerie moderne et d'outils statistiques pour étudier l'anatomie d'une partie de l'oreille interne, aussi complète soit elle, qui est les canaux semi-circulaires. Ce choix est justifié par le rôle important qu'ils jouent dans la fonction de l'équilibre. Mais aussi par le fait que la configuration tridimensionnelle de ces canaux est un déterminant majeur dans la physiologie de l'équilibre et de la physiopathologie du vertige et des troubles de l'équilibre.

Problématique et objectifs.

Il existe une relation étroite entre les potentiels d'action générés dans chaque canal (particulièrement de la partie considérée accéléromètre qui est la cupule) et la configuration tridimensionnelle de celui-ci. L'étude de celle-ci reste cependant difficile, en raison des dimensions infracentimétriques, de la fragilité après dissection de l'os temporal et des limites de la radiologie en coupes 2D.

C'est ainsi que nous avons pensé à procéder à cette étude qui aura pour objectif :

- de créer d'abord un modèle tridimensionnel des canaux semi-circulaires en utilisant un logiciel adapté.
- De vérifier la reproductibilité de ce modèle par l'utilisation d'une méthode semi-automatique de modélisation 3D
- De procéder à différentes mesures d'angles et de dimensions caractéristiques de la géométrie 3D des CSC
- D'étudier l'angle d'ouverture des différents canaux semi-circulaires sur des coupes TDM (2D) et valider la concordance de ces mesures avec les résultats

obtenus sur les modèles 3D. Ces mesures étant facilement réalisables sur une TDM des rochers.

- D'analyser ces résultats à travers une étude statistique comparant 24 patients ayant des TDM de rochers considérés normaux sur le compte rendu de radiologie
- Détailler des applications pratiques à cette modélisation tridimensionnelle.



Liste des abréviations

CSC : canal semi-circulaire

MPR : multiplanar reconstruction

VPPB : vertige positionnel paroxystique bénin

RVO : réflexe vestibulo -oculaire

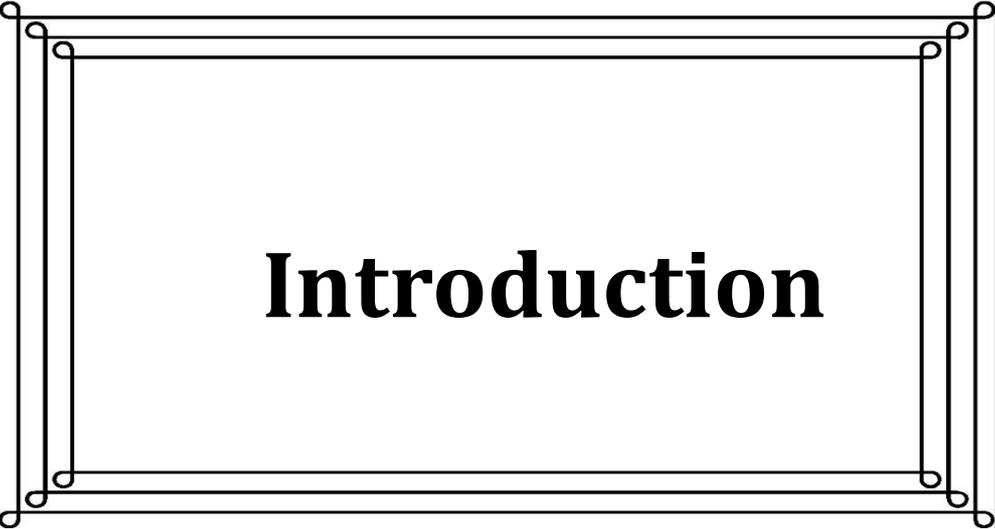


Sommaire

Table des matières

I. Introduction :	10
II. Rappels :	11
1. EMBRYOLOGIE	12
2. Anatomie	13
a. Le CSC supérieur :	15
b. Le canal postérieur	16
c. Le canal commun	17
d. Le canal latéral.....	17
I. Matériel et méthodes :	20
3. segmentation et volumétrie en utilisant le logiciel ITK-SNAP	21
e. Pré-requis :	21
f. L'interface utilisateur :	22
g. Création du label à utiliser pour la segmentation du CSC supérieur :	23
h. Selection de la région d'intérêt pour la segmentation semi-automatique	24
i. Définition des seuils d'intensité du canal semi circulaire supérieur :	25
j. Lancement de la segmentation semi-automatique :	26
k. Tableau des volumes et intensités :	30
4. Post processing utilisant le logiciel paraview	30
5. Traitement du fichier DICOM sur le logiciel OSIRIX	32
II. resultats :	36
1. volumes des CSC :	36
2. Angles formés par chaque paire de canaux :	37
3. La surface de l'anneau creux complet :	38
4. L'angle d'ouverture de chaque canal dans le vestibule :	39
5. Correlation entre surface de l'anneau creux et volume des CSC :	40
III. Discussion :	41
a. volumes des CSC :	41
b. Orientation des CSC :	44
c. Surface de l'anneau creux :	48
d. Applications pratiques de la modélisation 3D :	48
Conclusion générale	50
Bibliographie :	51

tableaux et figures :	52
1. Tableaux :	52
2. Figures :	52



Introduction

I. Introduction :

On reconnaît, communément, cinq sens qui sont la vision, le goût, l'odorat, le toucher et l'audition. Le sens de l'équilibre est souvent négligé alors qu'il peut parfaitement être considéré comme notre sixième sens. Même si l'homme se déplace rarement dans les trois dimensions de l'espace, notamment par rapport à de nombreuses espèces d'oiseaux ou de poissons, notre sens de l'équilibre est prévu pour détecter les mouvements du corps dans les trois dimensions. Les canaux semi-circulaires constituent la structure de l'oreille interne qui permet de détecter les accélérations angulaires dans les trois plans de l'espace. Fonction rendue possible grâce à une configuration spatiale adaptée à cette fonction.

Plusieurs publications s'intéressent à l'anatomie et à la physiologie de ces CSC, à travers des approches différentes, dépendantes de la spécialité de chaque auteur. Des modèles mathématiques et informatiques assez puissants ont été publiés et apportent de nouveaux éléments aux données anatomiques préexistantes.

Pour étudier cette anatomie, aussi complexe soit elle, nous avons eu recours à la combinaison de moyens d'imagerie de haute résolution (TDM de rochers) à des outils informatiques simples et disponibles gratuitement sur internet. Les résultats aussi bien graphiques que statistiques de cette étude seront abordés. Nous évoquerons également quelques applications pratiques de cette modélisation.

II. Rappels :

Le labyrinthe osseux ou capsule otique constitue une coque d'os compact autour du labyrinthe membraneux, une sorte de « carter ». Il en épouse les contours complexes mais en reste séparé par les espaces péri-lymphatiques.

Pairs et pratiquement symétriques, les labyrinthes osseux sont noyés en pleine masse pétreuse où ils conservent une complète individualité grâce à l'éburrination de leurs parois limitantes.

Il occupe le tiers moyen de la pyramide pétreuse, un peu plus près de la pointe que de la base mastoïdienne.

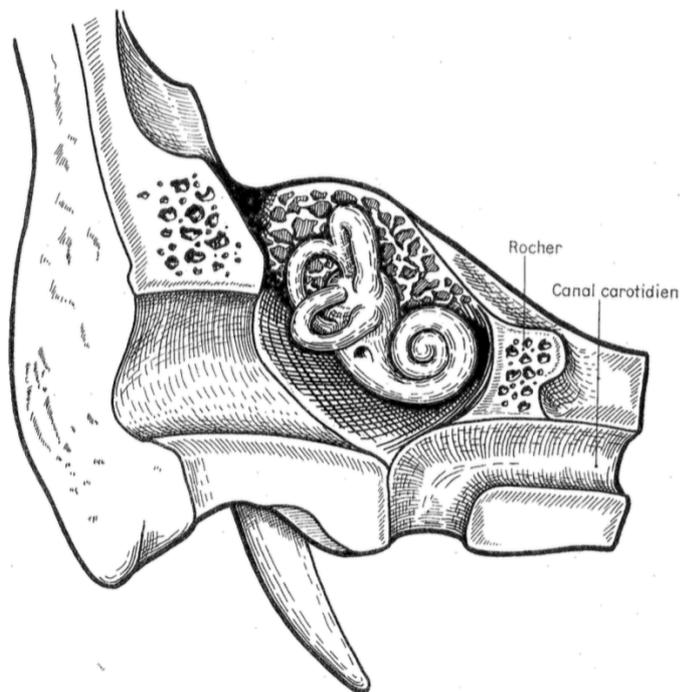


Figure 1 forme et situation du labyrinthe osseux selon Perlmutter et al [1]

1. EMBRYOLOGIE

Au 21^e jour de la vie embryonnaire, l'ectoderme de surface situé de part et d'autre du rhombencéphale s'épaissit pour former les placodes otiques. Elles s'invaginent rapidement et donnent les vésicules otiques (ou auditives). Elles sont revêtues d'un épithélium qui constituera le labyrinthe membraneux.

Les canaux semi-circulaires apparaissent initialement sous la forme de trois diverticules aplatis développés sur l'utricule. Leur paroi s'accrole en leur partie centrale puis se résorbe par apoptose, pour finalement constituer trois canaux dont une extrémité dilatée formera l'ampoule. Le conduit semi-circulaire antérieur est le premier à apparaître suivi par les conduits semi-circulaires postérieur et latéral. Au 49^e jour, la morphogénèse des conduits est terminée. L'épithélium ampullaire se différencie en une crête contenant les cellules neuro-sensorielles. [2]

Il peut arriver pour des raisons génétiques ou infectieuse que cette organogénèse s'arrête à un stade de son développement. Il en résulte une malformation correspondante au stade d'arrêt. [3]

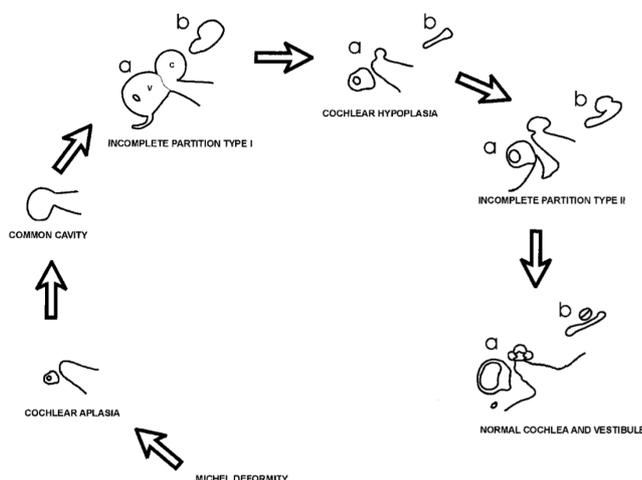


Figure 2 différents types de malformations de l'oreille interne en fonction du stade d'arrêt de développement selon Sennaroglu et al [3]

2. Anatomie

Les CSC constituent trois tubes creux :

- En forme de boucle incomplète de 7 à 8 mm de diamètre.
- Ouverts dans le vestibule par leurs deux extrémités.
- Une des extrémités est dilatée. Appelée extrémité ampullaire, elle est le siège d'une tache criblée pour le passage des rameaux des nerfs ampullaires.

On distingue 3 paires de canaux : canaux latéral ou horizontal, supérieur ou antérieur, postérieur.

Dimensions

- ✓ Longueur. : Le plus court est l'externe, 15 mm; le plus long est le postérieur, 20 mm.
- ✓ Diamètre. Leur section circulaire ou ovale a un diamètre qui varie entre 0,5 mm et 1,5 mm au niveau de l'ampoule.

L'orientation : a un très grand intérêt physiologique.

Schématiquement, on admet les données suivantes :

- ✓ le plan du canal latéral par rapport au plan de référence conventionnel le plus classique, le « plan de Francfort » (1882) passant :
 - par le pôle supérieur du méat auditif externe,
 - et par le bord orbitaire inférieur;
 - est oblique en bas et en arrière, faisant un angle de 30° avec ce plan.
- ✓ Le plan du canal supérieur, vertical, orienté de dedans en dehors et d'arrière en avant; Fait avec le plan sagittal un angle de 45° ouvert vers l'avant. Donc presque parallèle à l'axe du rocher.

- ✓ Le plan du canal postérieur, vertical, orienté de dedans en dehors et d'avant en arrière; il fait avec le plan sagittal un angle de 45° ouvert vers l'arrière. Donc presque parallèle à l'axe du rocher.

Ainsi : le canal supérieur d'un côté est dans le même plan que le canal postérieur de l'autre côté; **les trois canaux sont approximativement perpendiculaires entre eux.**

Cependant quelques corrections doivent être apportées :

- ✓ Il existe de nombreuses variations individuelles.
- ✓ Le plan du canal supérieur se rapproche du plan sagittal et est parfois oblique en haut et en dehors.
- ✓ Le plan du canal postérieur se rapproche du plan frontal.

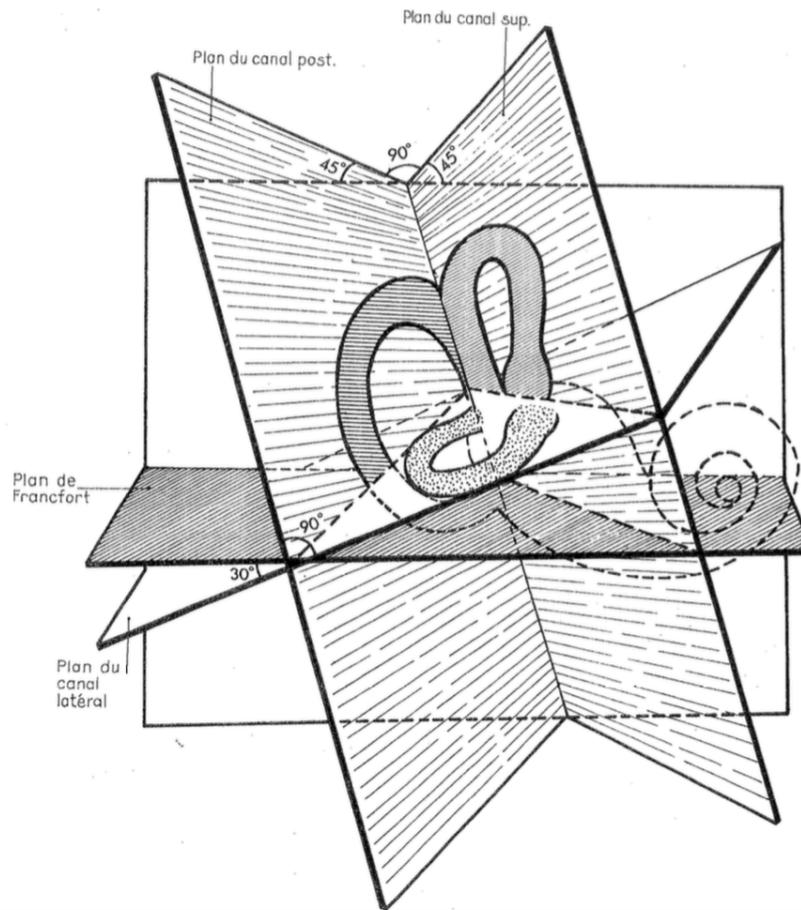


Figure 3 orientation dans l'espace des CSC selon Perlmutter et al [1]

a. Le CSC supérieur :

Il décrit un arceau planté sur le toit du vestibule.

- ✓ Situation des orifices,
 - Ampullaire : à la partie antérieure du plafond du vestibule.
 - Non ampullaire : dans le canal commun.
- ✓ La boude osseuse est très près de la corticale cérébrale du rocher, séparée d'elle par une très mince lamelle osseuse. Elle ne correspond pas à l'éminencia arcuata qui n'est qu'un simple relief osseux déterminé par un sillon cérébral.

b. Le canal postérieur

Forme une circonférence presque complète, profondément enfouie dans l'os pétreux.

- ✓ Situation des orifices.
 - Ampullaire : à cheval sur les parois inférieure, postérieure et externe du vestibule, très près de l'angle postéro-supérieur de la caisse, au niveau du sinus tympani, à 2 mm de la fenêtre ronde.
 - Non ampullaire : dans le canal commun.

- ✓ La boucle osseuse est grossièrement parallèle à la face cérébelleuse du rocher dont elle est plus ou moins éloignée : y fait parfois saillie (Girard); — peut en être distante de 10 mm ou même plus.

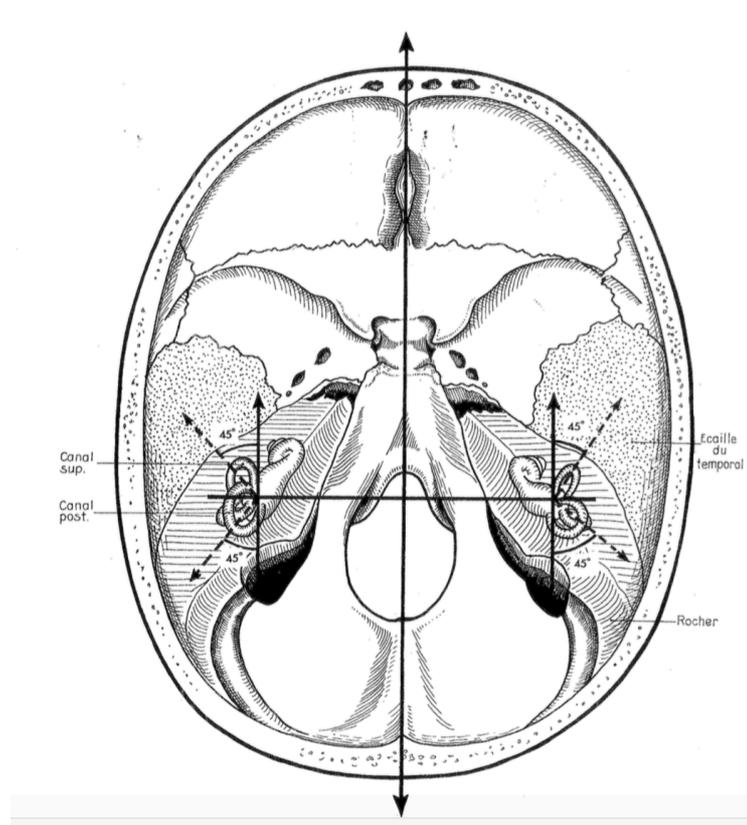


Figure 4 orientation des CSC verticaux selon Perlmutter et al [1]

c. Le canal commun

Est constitué par la réunion des canaux supérieur et postérieur.

- ✓ Haut de 2 à 3mm.
- ✓ S'ouvre à la partie postérieure du plafond du vestibule.

d. Le canal latéral

Dessine une boucle implantée sur la paroi externe du vestibule.

- ✓ Situation des orifices.
 - Ampullaire : à l'angle antéro-supérieur de la paroi externe du vestibule au-dessus de la fenêtre ovale.
 - Non ampullaire : à l'angle postéro-supérieur de la même paroi, en bas, en arrière et en dedans de l'orifice ampullaire entre : —
 - au-dessus : l'orifice du canal commun;
 - au-dessous et en dedans : l'orifice ampullaire du canal postérieur.
- ✓ La boucle osseuse constitue un excellent repère chirurgical car elle répond :
 - En haut et en arrière à l'antre mastoïdien.
 - En bas et en avant : à la paroi interne de la caisse où, elle est en rapport intime avec le canal facial qui s'insinue sous elle en formant le linteau de la fenêtre ovale.
- ✓ La ligne de démarcation entre le canal facial et le canal latéral n'est pas toujours bien visible.
 - En dehors : la région postérieure de l'attique. Son bord inférieur est en regard de la branche courte de l'enclume.
 - En arrière : elle se perd dans la masse osseuse de la paroi interne de l'antre.

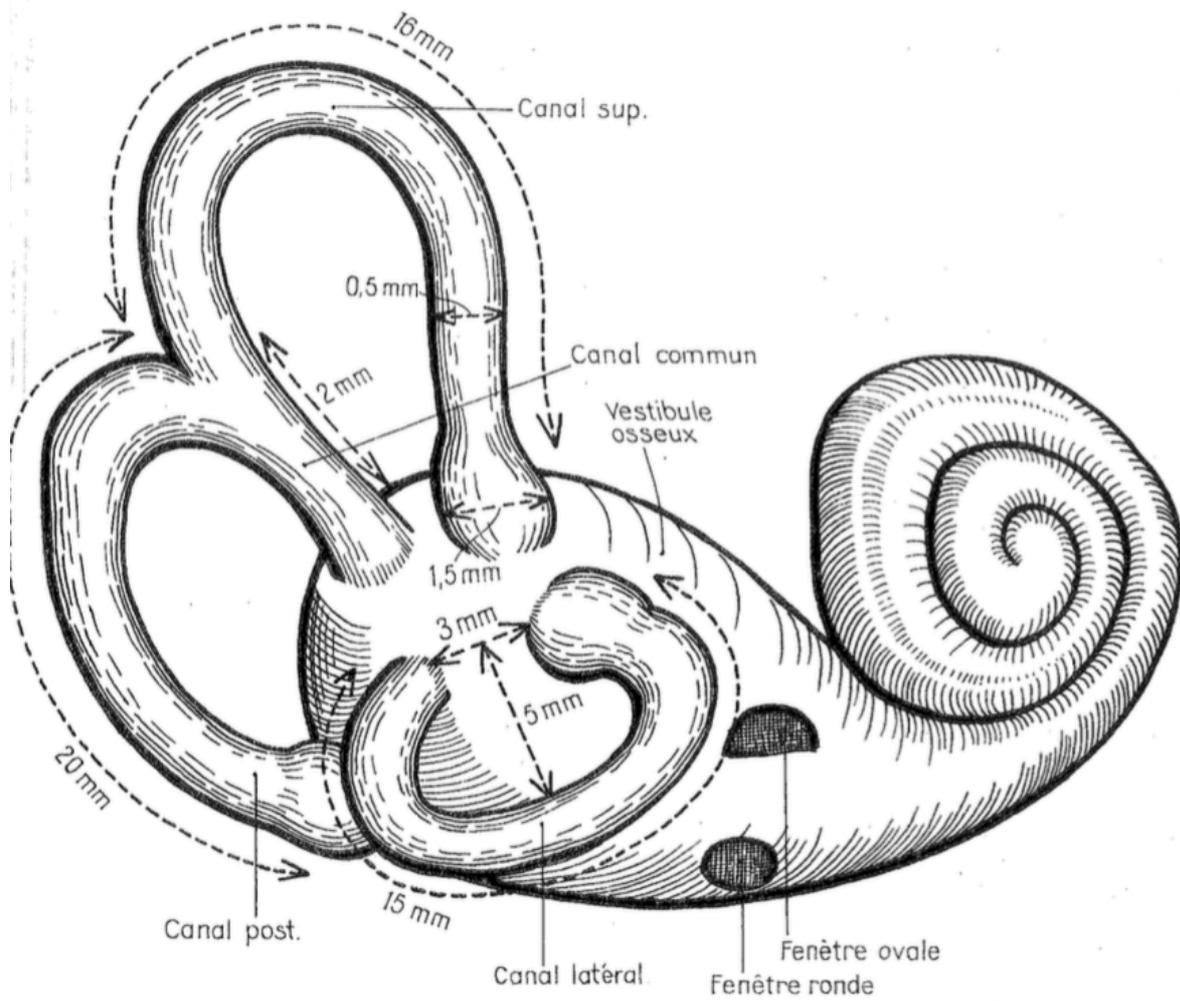


Figure 5 description et dimensions des CSC selon Perlmiter et al [1]

A decorative rectangular frame with a double-line border and small circular accents at the corners, enclosing the text.

Partie pratique

I. Matériel et méthodes :

Nous avons mené une étude rétrospective au service d'ORL et CMF du centre hospitalier Hassan II de Fès. Sont inclus dans cette étude 23 TDM des rochers réalisées dans le cadre du bilan pré-implantation cochléaire. Soit au total 46 rochers.

L'étude est organisée comme suit :

- segmentation et volumétrie en utilisant le logiciel ITK-SNAP
- traitement du fichier obtenu sur paraview
- les paramètres recueillis et étudiés en 3D :
 - o Volumes des CSC
 - o Angles entre les paires de canaux
 - o Angle que forme le canal latéral/plan de Frankfort
- Traitement du fichier DICOM sur le logiciel OSIRIX
- les paramètres recueillis et étudiés en 2D :
 - o Surface de l'anneau creux complet
 - o Angle d'ouverture du canal dans le vestibule
- Etude comparative de différents résultats obtenus en 2D et en 3D
- Proposition d'une nouvelle méthode d'évaluation de l'anatomie des CSC

3. segmentation et volumétrie en utilisant le logiciel ITK-SNAP

nous allons détailler la méthode qui a permis d'obtenir une modélisation tridimensionnelle de chaque canal semi-circulaire et de la crue commune.

e. Pré-requis :

il faut disposer d'un :

- Ordinateur tournant sous windows, macOs ou linux. De préférence avec souris à 3 boutons.
- Données DICOM à partir d'un CD de TDM des rochers.
- Une bonne connaissance de l'anatomie radiologique de l'oreille interne.

Tout d'abord, on télécharge et installe l'outil ITK-SNAP, disponible gratuitement sur le site officiel : <http://www.itksnap.org/>

Le logiciel ITK-SNAP fournit un ensemble d'outils pour faciliter et accélérer la segmentation des données volumétriques. Il dispose de 2 modes :

- le mode segmentation manuelle
- le mode segmentation semi-automatique.

Le mode manuel permet de suivre une structure sur plusieurs coupes tout en la délimitant par l'outil « pinceau » ou d'effacer éventuellement une erreur par l'outil « gomme ».

En mode semi-automatique, un puissant algorithme de segmentation par niveaux est utilisé pour segmenter les structures anatomiques en trois dimensions. Cet algorithme nécessite des instructions de l'utilisateur. Le logiciel fournit une interface simple permettant de fournir ces informations. Une fois le processus lancé, le logiciel s'occupe lui-même de définir les limites de la structure à segmenter, le paramétrage utilisateur ainsi que les corrections par mode manuel permettent d'affiner les limites. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle on le dénomine : mode semi-automatique. Ce mode a l'avantage d'être plus reproductible que le mode manuel pure.

f. L'interface utilisateur :

Après installation et ouverture, on clique sur fichier puis importer fichier DICOM qu'on sélectionne à partir d'un CD de TDM des rochers. L'interface obtenue comporte les coupes axiales natives et les reconstruction en plan sagittal et coronal automatiquement fournies (mode MPR). A gauche de l'écran se trouve l'ensemble d'outils nécessaires à la segmentation.

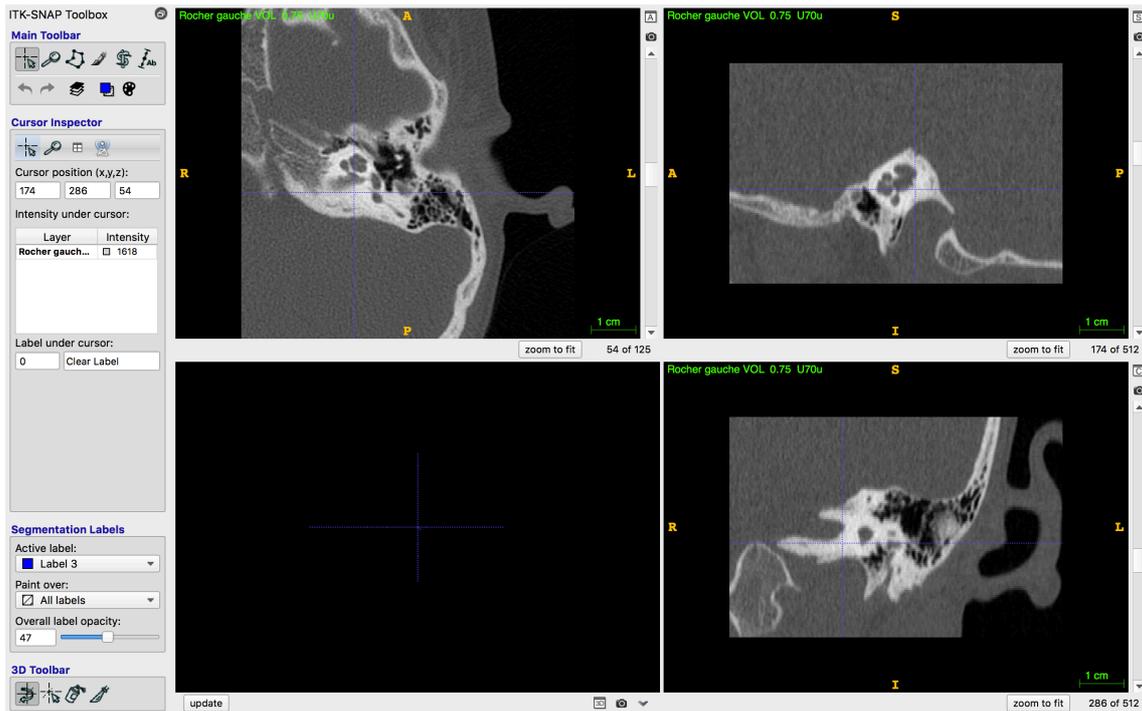


Figure 6 interface ITK SNAP après ouverture et importation d'une TDM des rochers

g. Création du label à utiliser pour la segmentation du CSC supérieur :

Les canaux semi-circulaires seront modélisés un par un. Pour étudier le canal CSC supérieur, nous utiliserons un label qui désignera cette structure. Le label jaune sera donc utilisé ici à titre d'exemple.

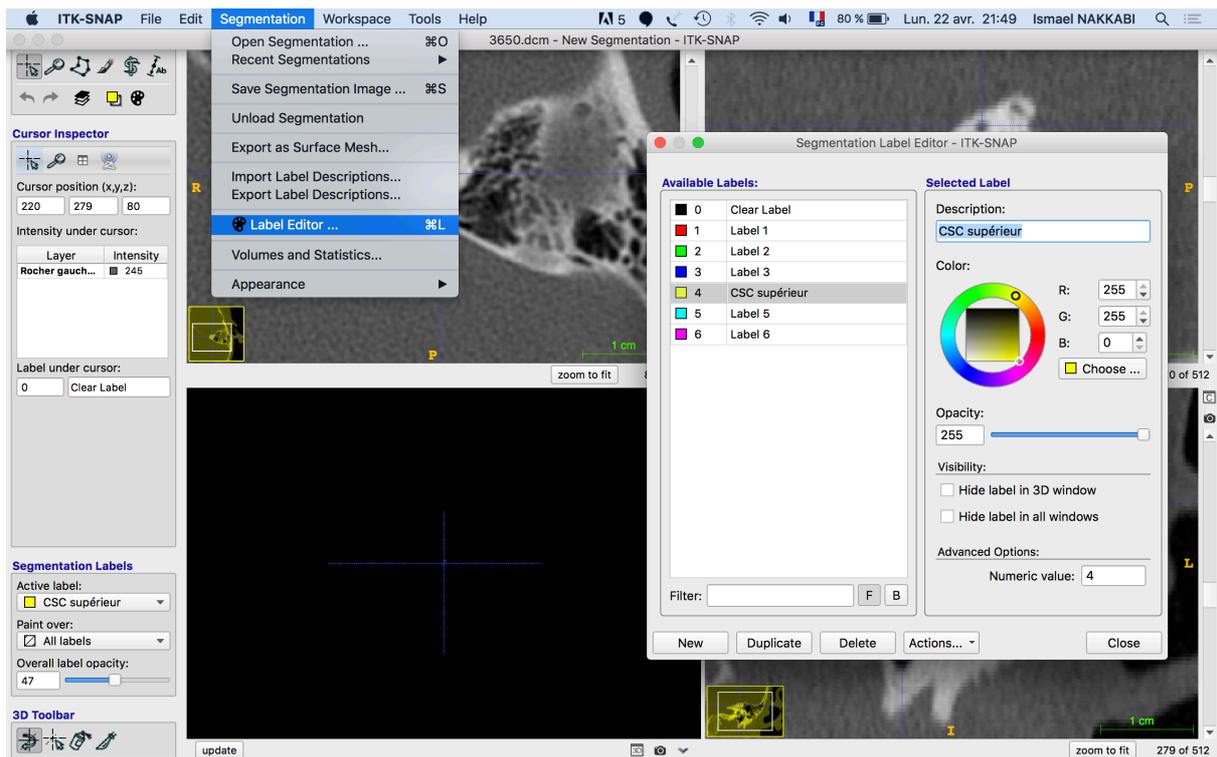


Figure 7 label jaune choisi pour le CSC supérieur, le nom du label est édité pour porter le nom du canal

h. Selection de la région d'intérêt pour la segmentation semi-automatique

Une fois le label du CSC est actif on selectionne l'icône de l'outil segmentation semi-automatique en haut de la barre gauche.



Figure 8 icône de l'outil segmentation semi-automatique

C'est à ce moment qu'il faudra délimiter une zone d'intérêt, rectangulaire. Les limites antérieure, postérieure, interne, externe,

supérieure et inférieure seront manuellement définies en se reportant sur les coupes en 3 plans de l'espace. Cette zone est ajustée faisant glisser les côtés de la boîte de sélection.

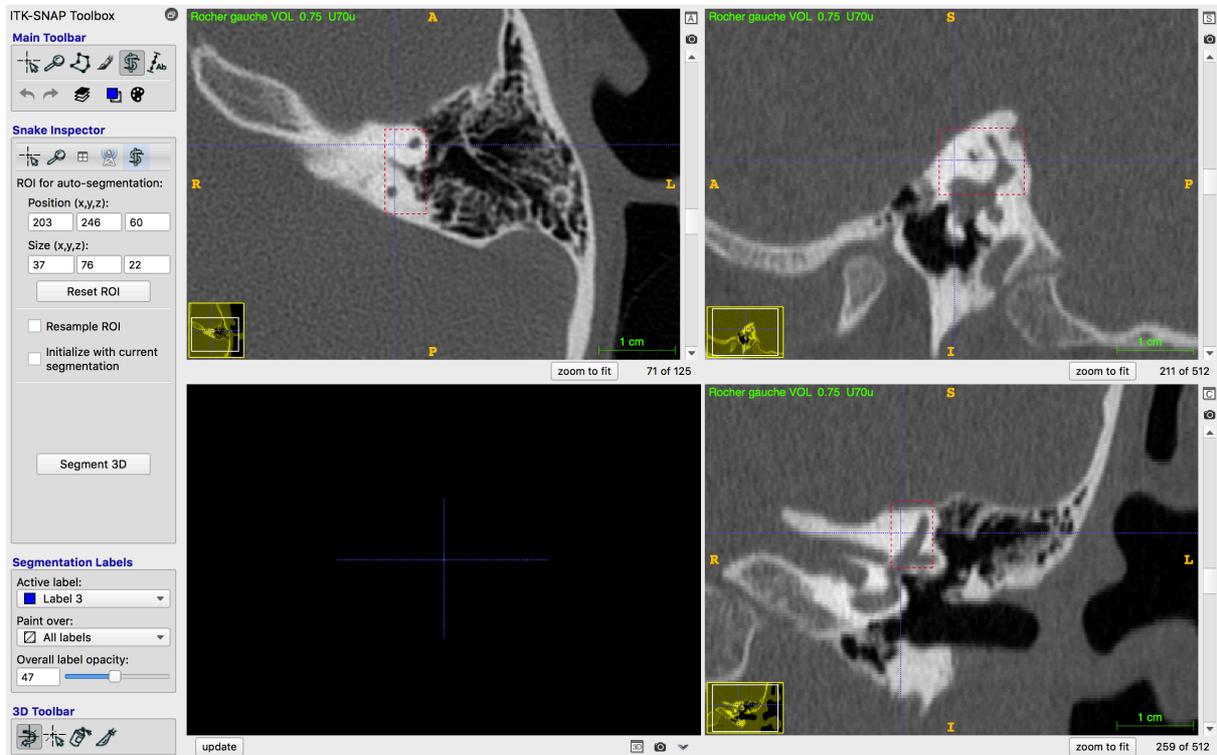


Figure 9 délimitation de la zone d'intérêt pour la segmentation du CSC supérieur

En cas de besoin on peut toujours réinitialiser la zone d'intérêt en cliquant sur « Reset ROI ». Une fois la zone d'intérêt est finalisée on clique sur « Segment 3D » pour passer à l'étape suivante.

i. Définition des seuils d'intensité du canal semi circulaire supérieur :

Une fois le bouton « segment 3D » appuyé, on se retrouve avec une interface utilisateur propre à la segmentation semi-automatique.

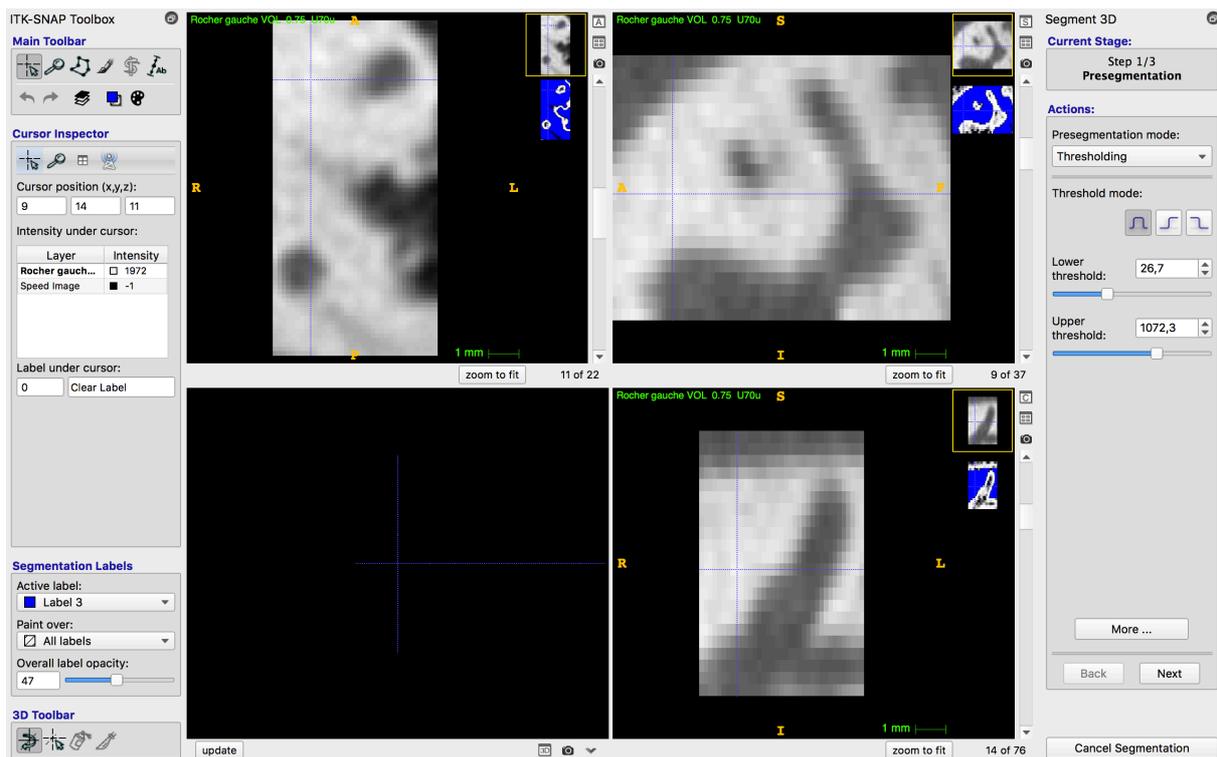


Figure 10 interface utilisateur de la segmentation semi-automatique

C'est à ce moment qu'on définit deux seuils d'intensité, supérieure et inférieure, permettant la visualisation totale de la structure d'intérêt. Ces seuils sont généralement -200 et 1000. Un ajustement manuel est souhaitable à ce niveau étant donné que l'image est constamment mise à jour lors du changement des seuils d'intensité.

On appuie alors sur « next »

j. Lancement de la segmentation semi-automatique :

On commence dans un premier temps par définir des bulles à l'intérieur du CSC supérieur. On clique sur une zone à l'intérieur du canal puis sur « add bubble » (dont la taille est ajustée pour ne pas dépasser les limites du canal). Nous avons utilisé 5 bulles dans la segmentation du CSC supérieur, une au sommet, 2 au milieu et 2 à chaque extrémité.

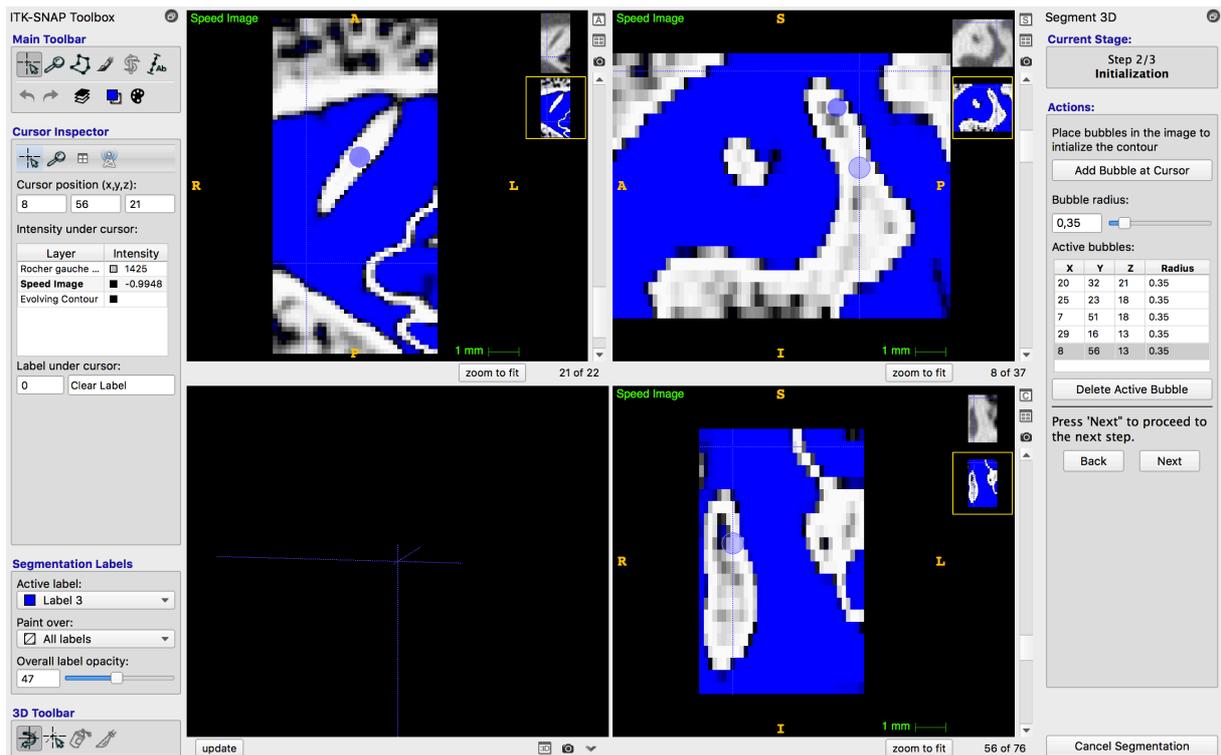


Figure 11 des bulles ont été définies tout au long du CSC supérieur

On appuie ensuite sur « next » puis sur la touche « play » pour lancer la segmentation semi-automatique. Il est préférable d'avoir une mise à jour continue de l'image sur le quadrant contenant l'image 3D. une fois tout le canal est pris on arrête la segmentation.

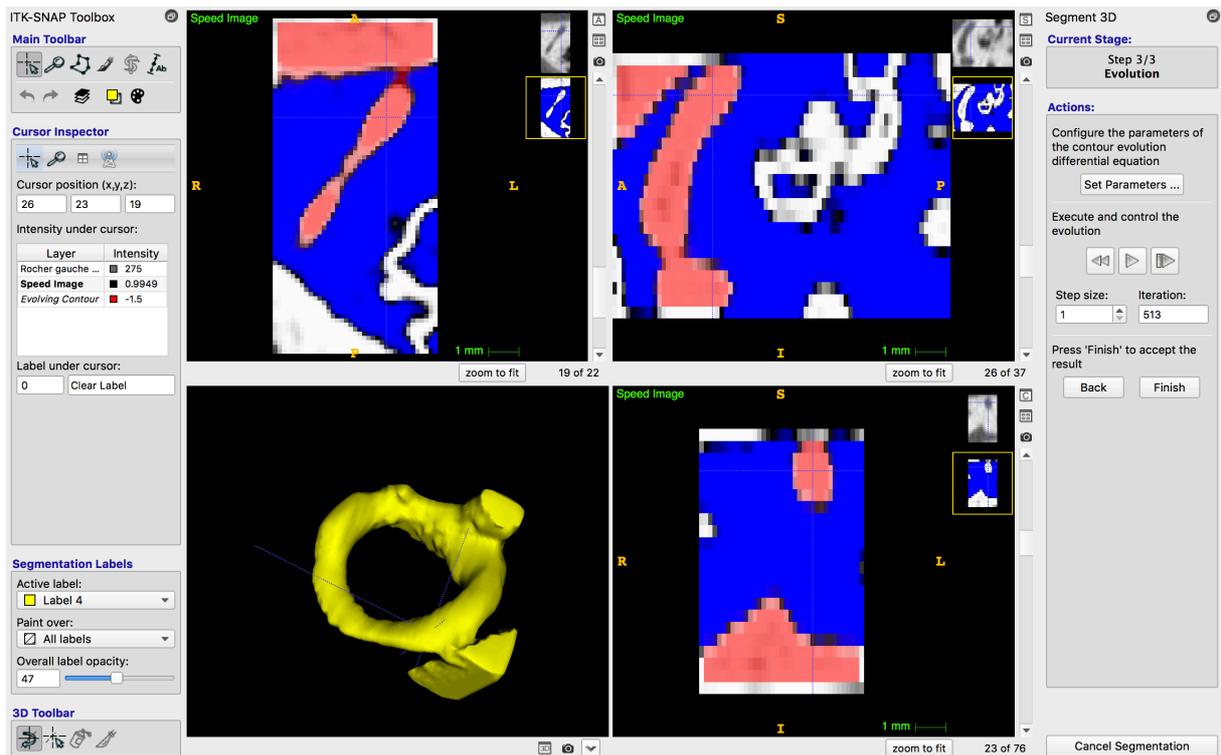


Figure 12 résultat de la segmentation semi automatique du CSC supérieur

L'outil « pinceau intervient par la suite pour effacer les autres structure contenues dans la zone d'intérêt et qui ne correspondent pas au CSC supérieur.

Les autres canaux ainsi que la crue commune sont modélisé en 3D de la même manière. Chaque structure sera désignée par un label de couleur différente.

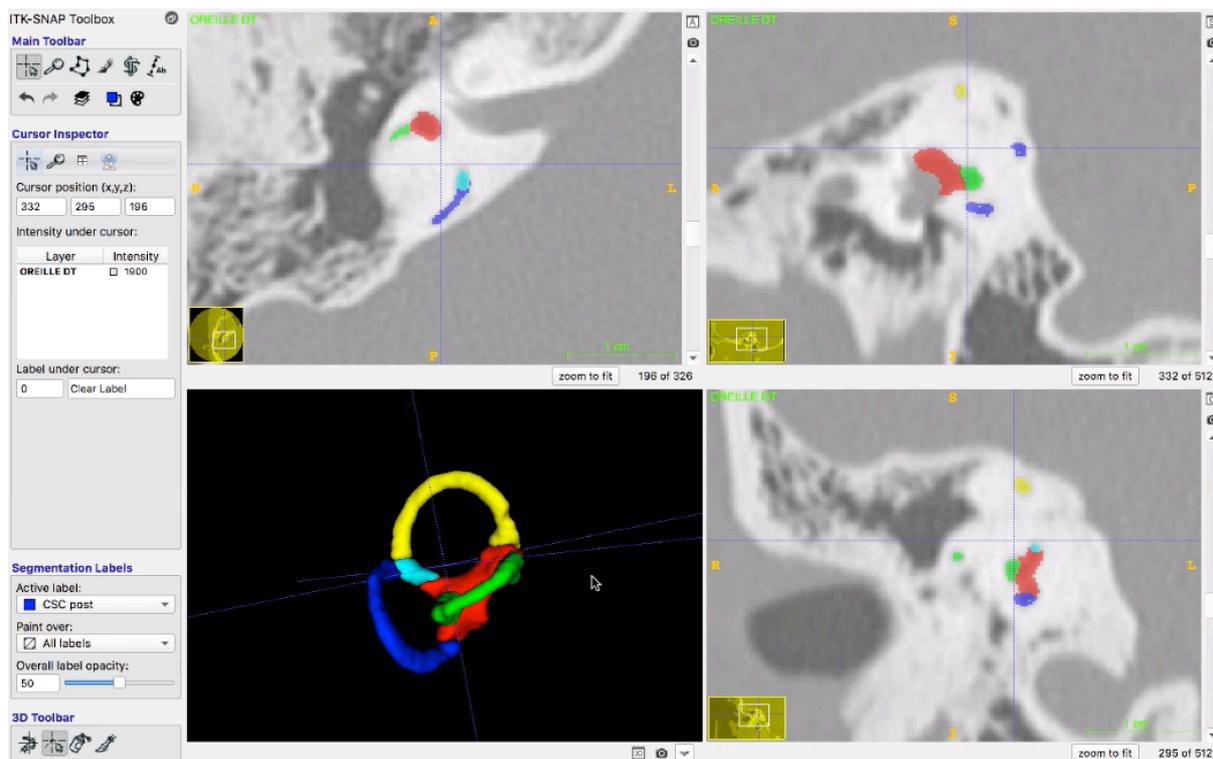


Figure 13 résultat final de la segmentation semi automatique des CSC et de la crue commune

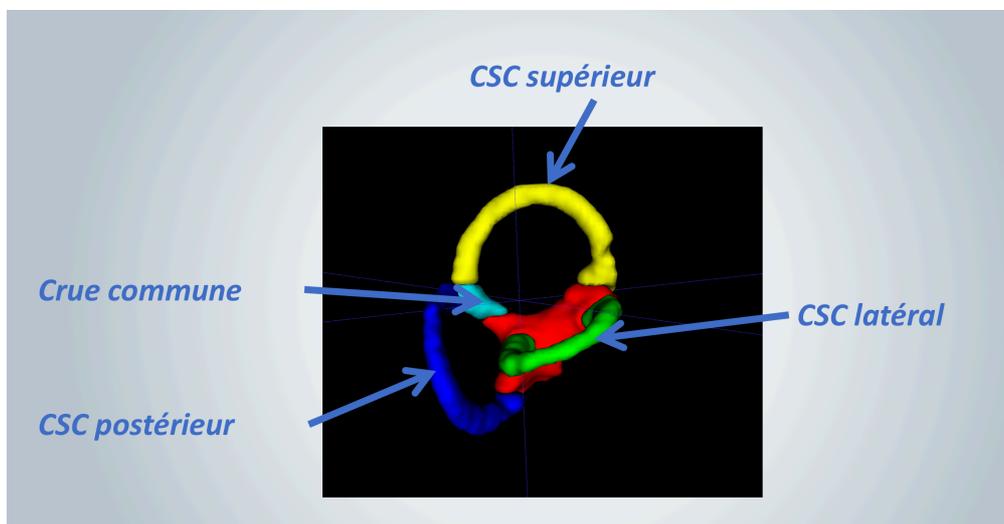


Figure 14 résultat final de la segmentation des CSC et de la crue commune

Le fichier obtenu sera enregistré en format « STL »

k. Tableau des volumes et intensités :

Une fois segmentation terminée, on clique sur segmentation puis « volumes and statistics » le tableau comporte le volume des CSC et leur intensité moyenne.

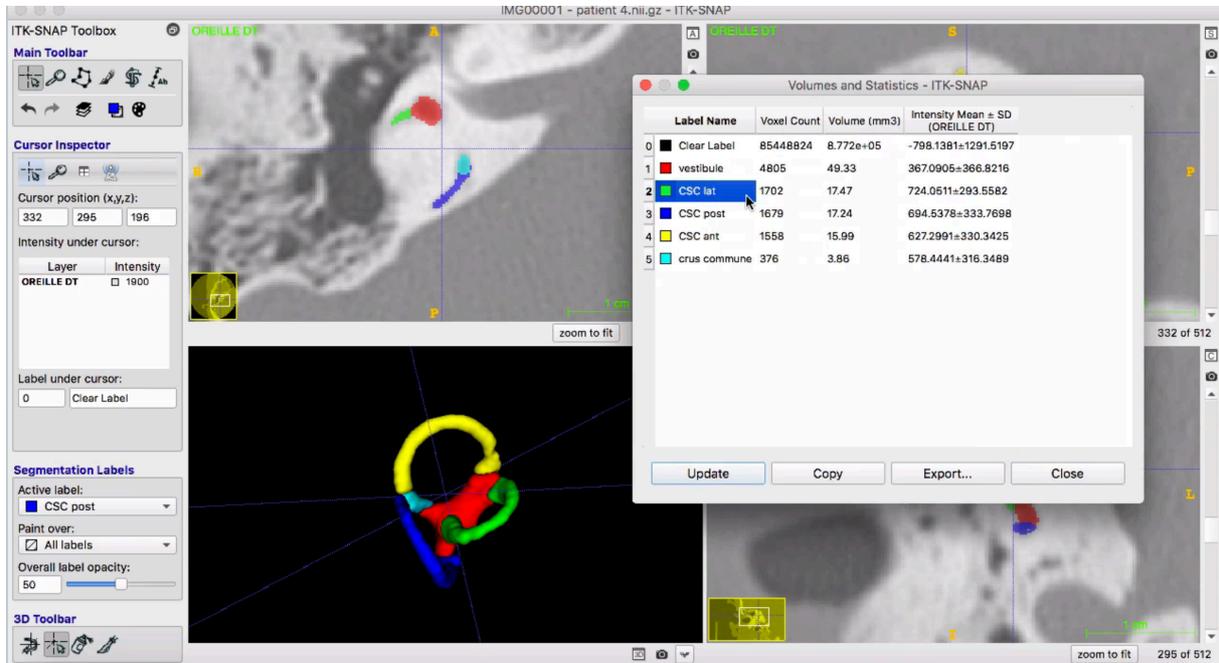


Figure 15 tabelau des volumes et intensités obtenue en fin de segmentation

4. Post processing utilisant le logiciel paraview

Il s'agit d'un puissant outil, également disponible gratuitement sur internet.

Paraview a de multiples utilisations. Il permet entre autre d'appliquer un mouvement (translation ou rotation voir mouvement complexe) au fichier 3D afin de visualiser directement le comportement du vestibule dans différents mouvements de la tête. Il permet également l'étude de contraintes/déformation (mais ceci rentre dans le cadre de l'étude de la physiologie des canaux et va au delà de la simple description anatomique)

dans ce travail nous nous sommes limité à la définition du plan correspondant à chaque CSC.

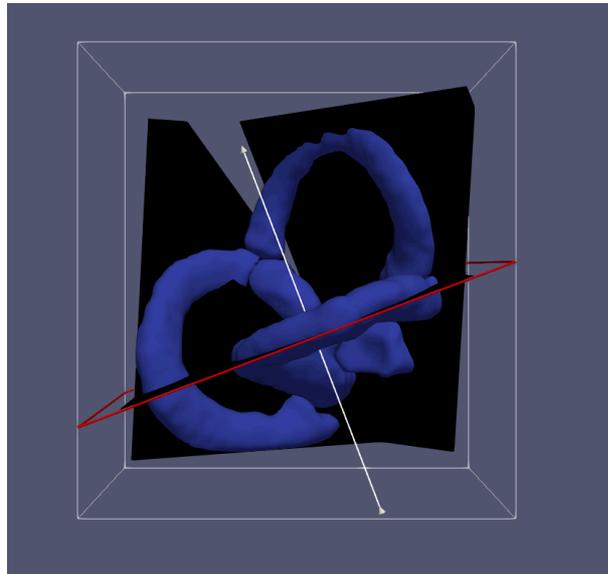


Figure 16 plan de chaque CSC tel qu'il a été défini sur le logiciel paraview

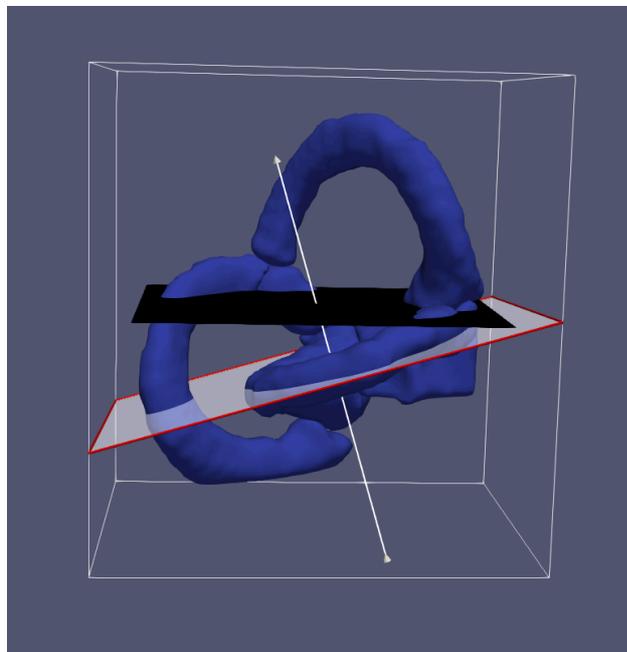


Figure 17 plan du CSC latéral par rapport au plan de Franckfort

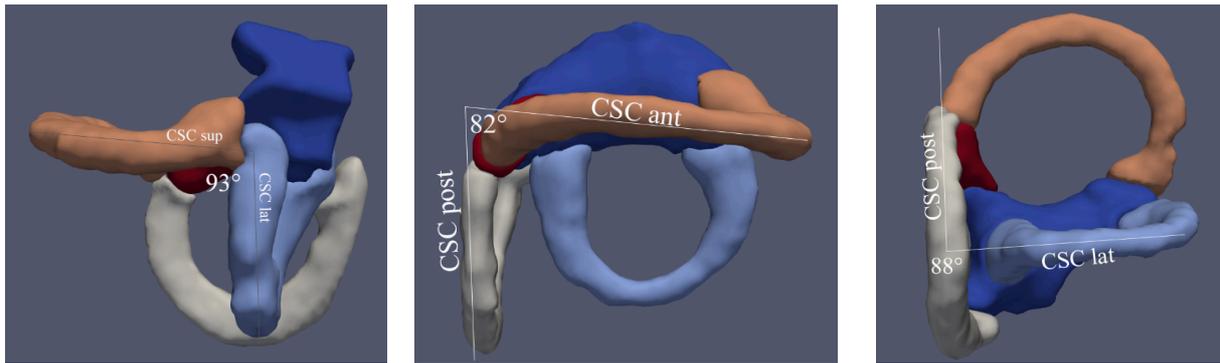


Figure 18 angles formés par chaque paire de canaux

5. Traitement du fichier DICOM sur le logiciel OSIRIX

Une fois les données DICOM du patient sont récupérés sur le logiciel OSIRIX

On ouvre le mode 3D MPR

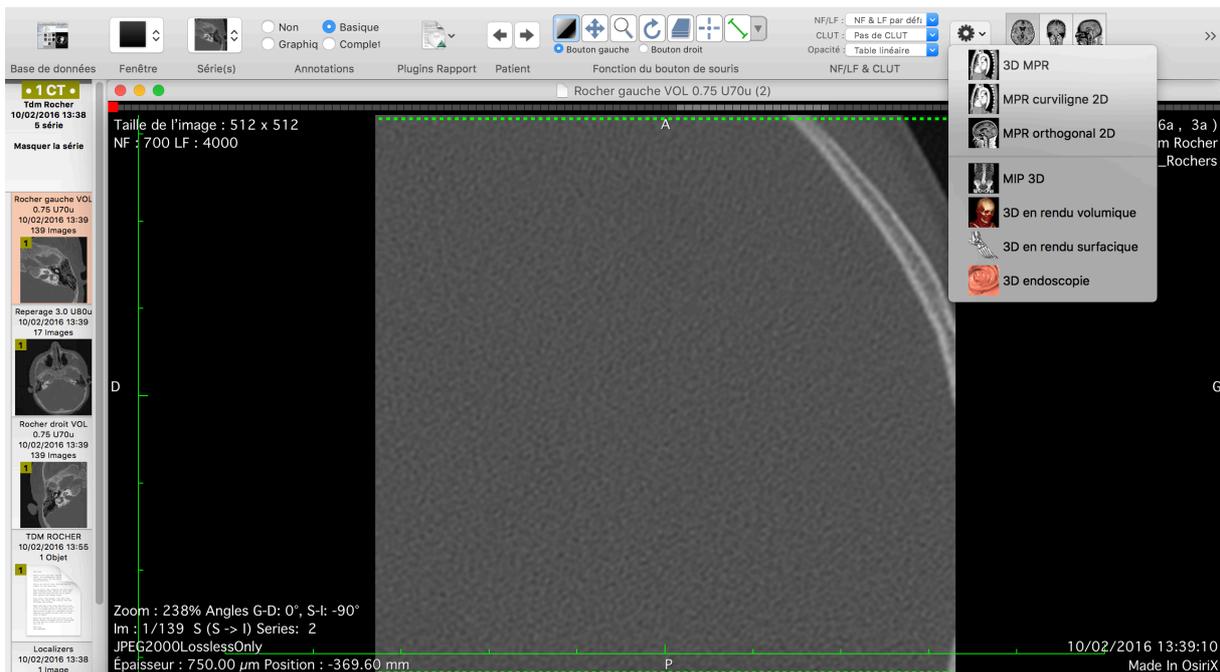


Figure 19 fenêtre du logiciel OSIRIX représentant TDM du rocher gauche

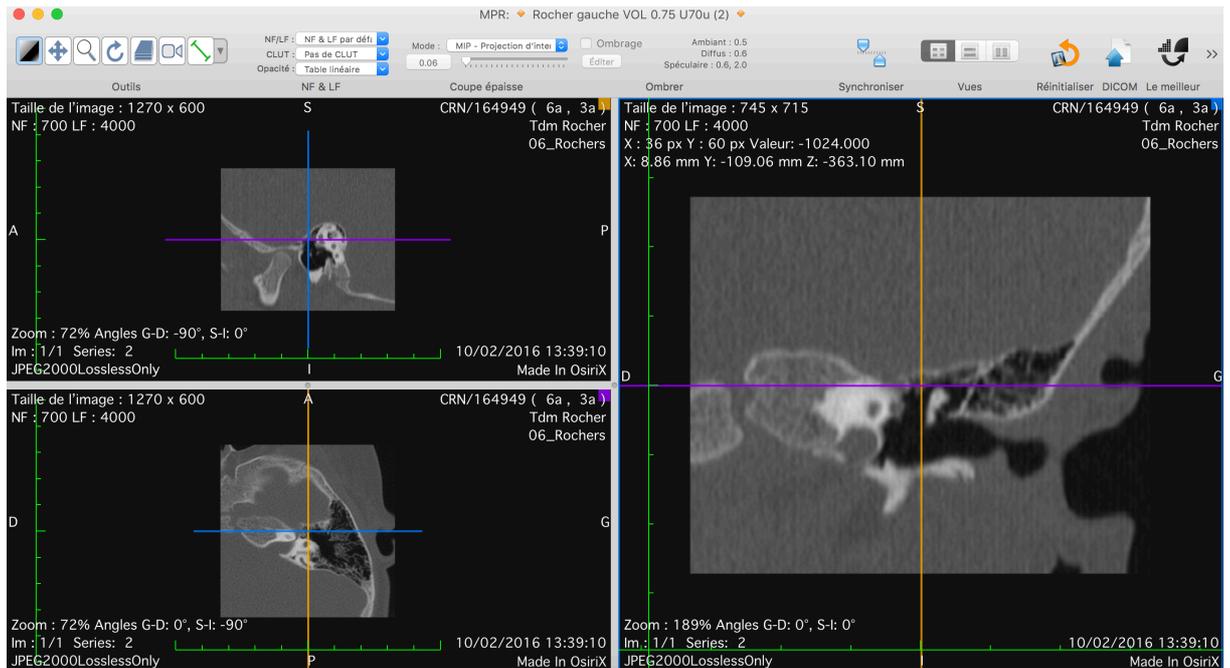


Figure 20 mode 3D MPR sur le logiciel OSIRIX

Sur ce mode on a les coupes axiales natives de la TDM, en bas à gauche, et les reconstructions en coupes sagittal et coronal. La coupe axiale est représentée par une ligne violette sur les deux autres coupes.

Pour chaque canal semi-circulaire nous avons réalisé une coupe à simple ou double obliquité permettant de passer dans le plan du canal en question.

Si on prend comme modèle d'étude le CSC latéral, on se reporte à la coupe axiale et on défile les coupes passant par ce canal. Sur la coupe au dessus, on récupère le plan montrant les deux extrémités (antérieure ampulaire et postérieure non ampulaire) du CSC latéral. C'est à ce moment qu'on incline la ligne violette (qui est à la base celle de la coupe axiale) pour qu'elle passe par les deux extrémités du canal. La ligne violette représente désormais une coupe oblique passant par le plan du canal CSC latéral. Il est possible de rajouter quelques ajustements sur la 3^{ème} coupe. Le resultat est représenté en figure

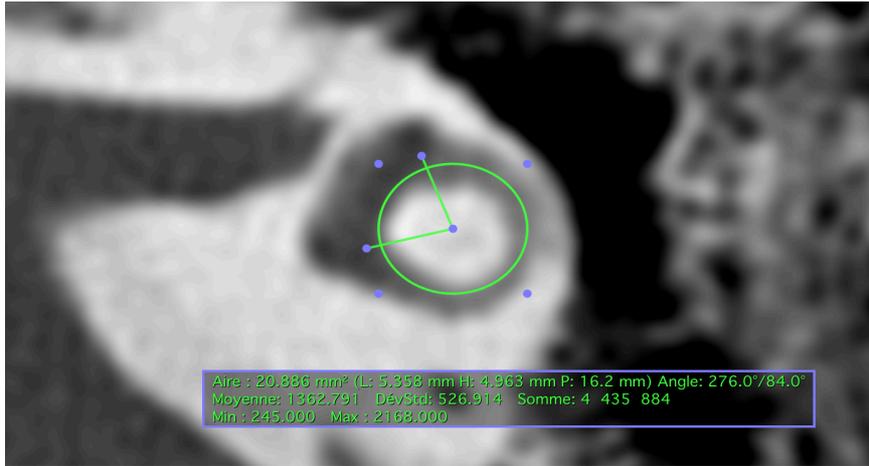


Figure 21 plan oblique passant par le CSC latéral

Le logiciel OSIRIX offre également la possibilité de mensurations. La fonction anneau a été utilisée pour tracer un anneau creux passant au centre du CSC. La fonction angle a également été utilisée pour définir l'angle d'ouverture du canal (formé à partir du centre de l'anneau creux par les deux extrémités du CSC)

Nous avons procédé de même pour les autres CSC.

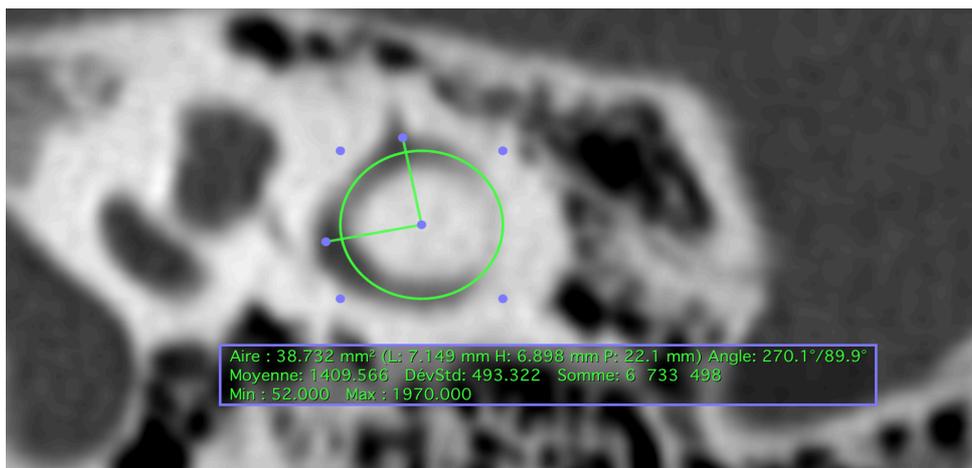


Figure 22 coupe à double obliquité passant par le plan du CSC postérieur

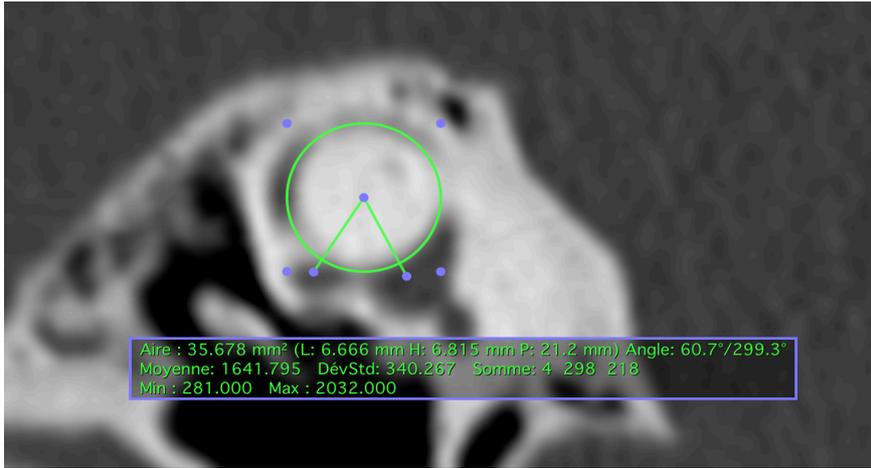


Figure 23 plan à double obliquité passant par le CSC supérieur

II. resultats :

1. volumes des CSC :

tel qu'il a été précédemment annoncé, nous avons pu mesurer le volume de chaque canal semi-circulaire. Le nombre total de rochers est de 46.

- Le volume des CSC latéraux varie entre 13,04 et 19,40 avec une moyenne de 16,5 mm³
- Le volumes des CSC supérieurs varie entre 16,70 et 22,61 avec une moyenne de 19,3 mm³
- Le volumes des CSC postérieurs est de 18,14 et 22,01 avec une moyenne de 21,7 mm³

Volume (mm³)	Min	Max	Moyenne
CSC latéral	13,04	19,40	16,5
CSC supérieur	16,70	22,61	19,3
CSC postérieur	18,14	22,01	21,7

Tableau 1 volumes des CSC obtenus après segmentation

2. Angles formés par chaque paire de canaux :

Les angles formés par chaque paire de canaux a également été étudié :

- Les angles formés entre les paires de canaux vont de 78 à 97 degrés. Avec des moyennes allant de 85 à 92 degrés.
- Le CSC latéral forme un angle par rapport au plan de Frankfort de 16 à 34 degrés, avec une moyenne de 24 degrés.

On observe une variabilité interindividuelle, des valeurs sensiblement égales (mais pas toujours) à 90 degrés.

Angles	Min	Max	Moyenne
LAT - SUP	81°	92°	87°
LAT - POST	83°	97°	92°
POST - SUP	78°	88°	85°
LAT - Frankfort	16°	34°	24°

Tableau 2 angles formés par chaque paire de canaux et entre le CSC latéral et plan de Frankfort

3. La surface de l'anneau creux complet :

Cette surface correspond à l'anneau creux qui représenterait le CSC s'il était « complet »

Cette surface obtenue sur TDM en coupes 2D sera comparée aux volumes obtenus après modélisation 3D.

La surface moyenne pour le CSC latéral est de 21, elle est de 34 pour le CSC supérieur et de 37 pour le CSC postérieur.

Surfaces (mm²)	Min	Max	Moyenne
CSC lat	18,4	24,4	21
CSC sup	32,1	38,5	34
CSC post	33	38,1	37

Tableau 3 surfaces de l'anneau creux obtenu sur coupes 2D TDM (osirix)

4. L'angle d'ouverture de chaque canal dans le vestibule :

L'angle d'ouverture moyen du CSC latéral sur le vestibule est de 79 degrés. Celui du CSC supérieur est de 62 degrés. Tandis que celui du CSC postérieur est de 95 degrés.

Il a également été observé une variabilité interindividuelle concernant cet angle d'ouverture.

Angles	Min	Max	Moyenne
CSC latéral	72°	84°	79°
CSC supérieur	54°	67°	62°
CSC postérieur	82°	102°	95°

Tableau 4 angles d'ouverture des CSC sur le vestibule obtenus en coupes TDM 2D

5. Correlation entre surface de l'anneau creux et volume des CSC :

	Surfaces (mm²)	Volume en 3D (mm³)	p
CSC lat	21	16,5	0,02
CSC sup	34	19,3	0,02
CSC post	37	21,7	0,003

III. Discussion :

Les CSC jouent un rôle important dans la détection des accélérations angulaires. Cette fonction est étroitement liée à une configuration spatiale lui conférant cette fonction.

Dans notre étude, les CSC ont été reconstruits en trois dimensions d'après une modélisation 3D de TDM des rochers. Ces modèles 3D nous ont permis d'obtenir des données réelles sur les dimensions et la configuration spatiale des CSC.

Plusieurs auteurs se sont penchés sur ces particularités aussi bien chez des spécimens humains qu'animales.

a. volumes des CSC :

Les résultats des études embryologiques et anatomiques ont montré que la configuration adulte du labyrinthe est atteinte après environ 12 semaines de gestation et que la taille de l'adulte est atteinte après environ 25 semaines de gestation. Il a également été prouvé qu'il existe une variation très minimale avec l'âge, le sexe, le côté et la race se trouve après la naissance [4].

En effet, Melhem et al [5] s'est intéressé à la reproductibilité des mesures volumétriques générées par une segmentation semi automatique d'images IRM de l'oreille interne. Il conclut à une haute reproductibilité des mesures, faible coefficient de variation et une faible variabilité inter-opérateur.

Volunteer	Age (y)/ Sex	Left Inner Ear Volume (mm ³)	Right Inner Ear Volume (mm ³)	L-R (mm ³)
1	12/M	258.3	252	6.3
2	19/F	198.3	235	-36.7
3	24/F	235	264.1	-29.1
4	26/F	240.5	234.6	5.9
5	27/M	257.1	184.7	72.4
6	28/M	256.6	272.1	-15.5
7	29/F	241.9	220.8	21.1
8	30/M	233	239.3	-6.3
9	33/F	216.3	243.5	-27.2
10	34/M	223.1	202.7	20.4
11	36/M	272.6	225	47.6
12	36/M	197.6	227.3	-29.7
13	39/M	237.7	257.8	-20.1
14	41/M	262.3	247.5	14.8
15	41/M	211.2	211.2	0
16	43/M	226.4	200.6	25.8
17	44/M	225.2	227.3	-2.1
18	48/M	258	233	25
19	48/F	172.3	195.5	-23.2
20	52/F	218	204.1	13.9
21	57/F	229.2	220.3	8.9
22	60/F	214	215.6	-1.6
23	72/F	197.6	183.3	14.3

Tableau 5 volume de l'oreille interne obtenu par segmentation semi automatique d'après Melhem et al [5]

Il propose qu'une combinaison d'étude volumétriques à une imagerie de haute résolution pourraient, à l'avenir, permettre de stadifier les patients atteints de surdité congénitale en trois groupes :

- ceux qui présentent des anomalies de configuration grossières de l'oreille interne (malformations par arrêt de développement avant les 12 semaines de gestation);
- ceux avec des anomalies volumétriques mais sans anomalies grossières de configuration (entre 12 et 25 semaines de gestation);
- ceux sans anomalies volumétriques ou de configuration (après 25 semaines de gestation). Cette stratification peut avoir des conséquences sur la gravité et la progression de la perte d'audition neurosensorielle et peut également aider à déterminer

Bradshaw et al insiste également sur la nécessité d'avoir une analyse semi-automatisée afin de minimiser la subjectivité et la variabilité de l'opérateur [6].

Nous n'avons pas trouvé d'articles rapportant le volume exacte de chaque canal semi-circulaire tel que nous rapportons dans cette étude.

Certains auteurs tel que Lee et al [7] étudient indirectement la taille des canaux semi-circulaires par plusieurs paramètres géométriques.

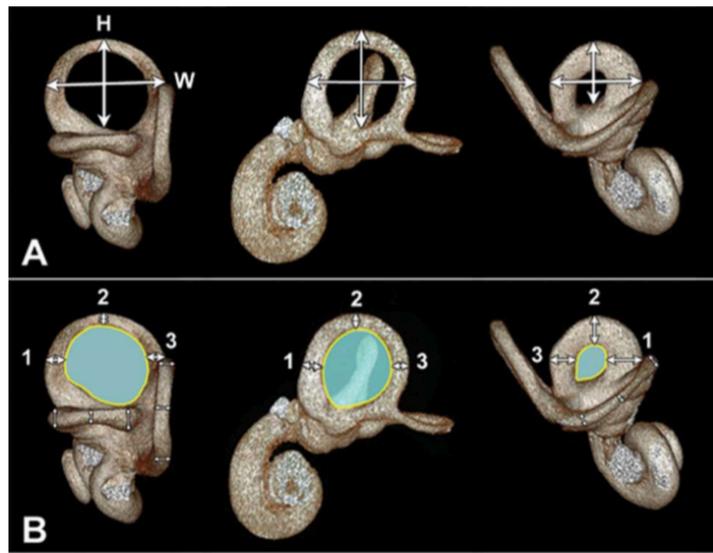


Figure 24 paramètres étudiant la taille des canaux semi circulaires d'après Lee et al [7]

A : hauteur et largeur des CSC

B : diamètre interne des CSC

	ASCC		PSCC		LSCC	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Height	6.5	0.5	6.7	0.6	4.9	0.6
Width	8.0	0.5	7.7	0.5	6.5	0.7
Radius of curvature	3.6	0.2	3.6	0.2	2.9	0.3
Perimeter of distorted circle	18.6	1.7	18.0 ^a	2.1	10.3	2.9
Area of distorted circle (mm ²)	24.3	4.2	19.6 ^a	4.0	7.5	3.1

Unit: mm; Radius of curvature=0.5(height+width)/2.

^aSignificant difference between males and females ($P<0.05$).

**Tableau 6 dimensions des CSC d'après Lee et al [7]
hauteur et largeur**

	ASCC		PSCC		LSCC	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Internal width 1	1.2	0.2	1.4	0.2	2.1	0.3
Internal width 2	0.9	0.2	1.5	0.2	1.7	0.3
Internal width 3	1.2	0.1	1.4	0.2	1.7	0.2
Internal height 1	1.0	0.1	1.0	0.1	1.2	0.2
Internal height 2	0.7	0.1	1.0	0.1	0.8	0.1
Internal height 3	0.9	0.1	0.9	0.1	1.2	0.3

**Figure 25 dimensions des CSC d'après Lee et al [7]
diamètre interne**

Dans notre série, nous avons constaté que le volume des CSC varie entre 13,04 et 22,61 mm³. Le CSC latéral étant le moins volumineux et le CSC postérieur le plus volumineux et ce chez tous les patients de la série.

b. Orientation des CSC :

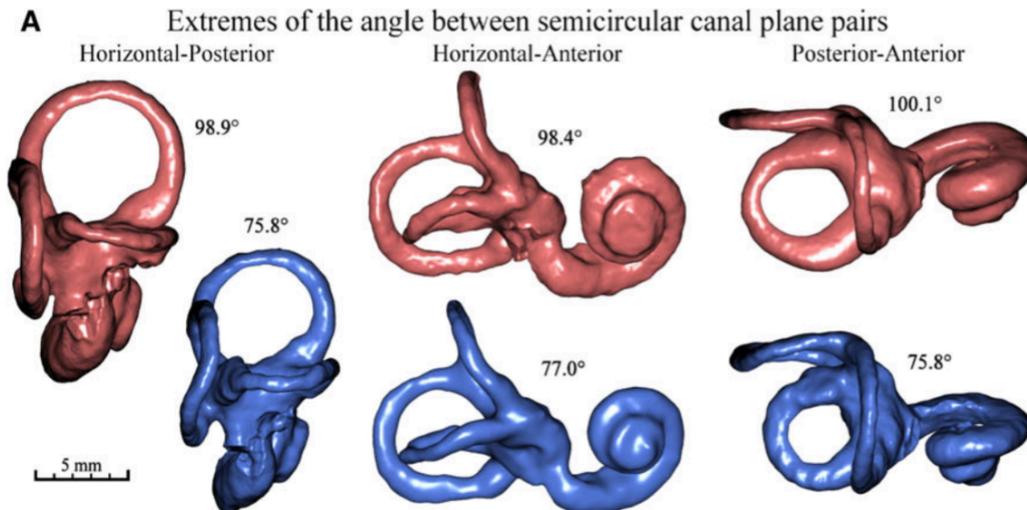


Figure 26 variabilité des angles entre les CSC d'après Bradshaw et al [6]

La connaissance précise de l'orientation absolue (par rapport aux repères du crâne) et de la position du CCS est essentielle pour la compréhension des résultats d'examens au cours de l'évaluation clinique et des explorations paracliniques du vertige (notamment la VHIT) [8].

De ce fait, cette orientation a suscité une littérature abondante de part son intérêt physiologique mais aussi et surtout ses implications dans la thérapeutique liée 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 premiers 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). Plusieurs études ultérieures sont venues rectifier cette notion. Nos résultats désapprouvent également cette notion d'orthogonalité parfaite.

Hashimoto [9] 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 [10] ont mesuré des angles de 91.0° à 94.9° entre CSC homolatéraux. Lee et al [7] 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.

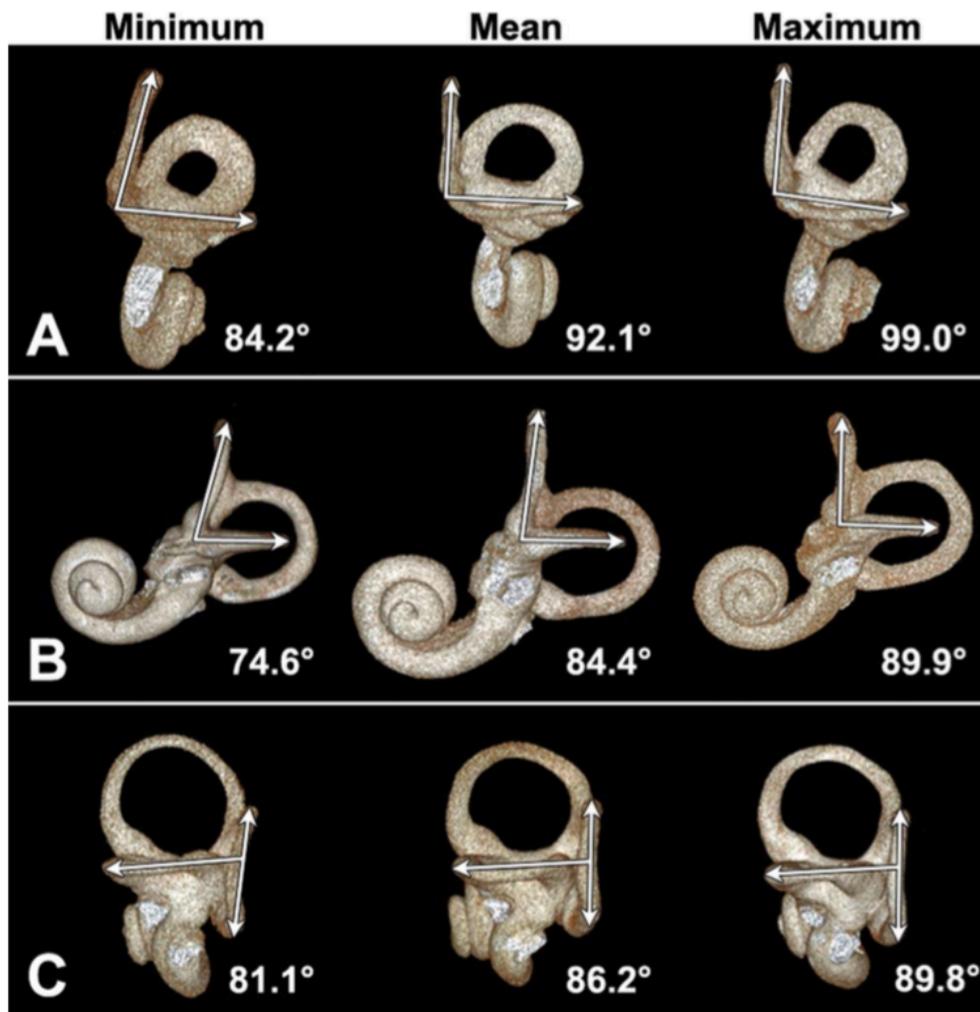


Fig. 2. Examples of angles between the SCCs. **A:** Angles between the ASCC and PSCC. **B:** Angles between the ASCC and LSCC. **C:** Angles between the PSCC and LSCC.

Figure 27 angles formés par les paires de canaux semi-circulaires d'après Lee et al [7]

Il est communément admis que les trois canaux semi-circulaires sont placés à perpendiculaires entre eux et le canal semi-circulaire latéral est plus petit que les canaux semi-circulaires antérieur et postérieur. Une connaissance précise de la taille et des relations spatiales des canaux semi-circulaires est essentielle [7]. D'après Charpiot et al [11], les angles entre les trois canaux ne sont pas exactement à 90 degrés: ils sont respectivement de 92,1, 84,4 et 86,2 degrés entre les canaux antérieur et postérieur, antérieur et latéral, et postérieur et latéral semi-circulaire. Cette étude a été réalisée avec un logiciel de reconstruction en trois dimensions, qui

a permis de mesurer avec précision les angles entre les canaux semi-circulaires et la surface du cercle déformé formé par chaque canal semi-circulaire.

c. Surface de l'anneau creux :

nous avons noté une corrélation entre le volume des canaux semi circulaires obtenu en modélisation 3D et la surface de l'anneau creux obtenu en coupe 2D. cette corrélation est importante à prendre en considération pour avancer des conclusions quant à la taille d'un CSC sans passer par une modélisation 3D.

l'angle d'ouverture utilisé dans cet étude pourrait avoir des implication physiopathologiques, nous avons noté que le CSC postérieur s'ouvre d'un angle large dans le vestibule (95° en moyenne) alors que le VPPB du CSC postérieur est le plus fréquent.

d. Applications pratiques de la modélisation 3D :

Outil pédagogique :

Enfin, même si ce n'est pas la vocation première de la modélisation, la simulation de rotation du canal lors d'une rotation de la tête peut être facilement visualisée avec les logiciels de représentation, en trois dimensions et dans n'importe quelle position. C'est un formidable outil pédagogique pour aborder le fonctionnement normal et pathologique des canaux semi- circulaires, domaine très difficile à appréhender de l'avis général des médecins ORL. Le

Conclusion générale et perspectives déplacement de la cupule et du système canalaire lors d'une rotation de la tête est impossible à observer, et l'ORL fait appel à des représentations mentales tant pour apprendre la physiologie que pour analyser les pathologies en consultations.

Le vertige positionnel paroxystique bénin :

Les VPPB, par leurs caractéristiques cliniques, déclenchés par certaines position de la tête, évoquent fortement une cause mécanique. Ils peuvent apparaître sans cause identifiable, mais sont très fréquents dans les suites d'un traumatisme crânien. L'activité de recherche scientifique est en plein développement pour les VPPB. C'est le reflet des difficultés et incohérences des représentations actuelles, constatées quotidiennement en clinique. Si les vertiges positionnels « typiques » ne posent pas de problème de diagnostic ni de traitement, nombre de vertiges positionnels ne sont pas du tout typiques, et les bilans complémentaires ne révèlent pourtant aucune cause neurologique. Des phénomènes mécaniques plus complexes que les schémas actuels sont probablement en cause, et probablement localisés au niveau du récepteur périphérique lui-même. Ces hypothèses, impossibles à observer in vivo, peuvent être testées par des simulations numériques sur ces modèles 3D.

Conclusion générale

Nous avons pu décortiquer les détails de l'anatomie de l'oreille interne et particulièrement des canaux semi circulaires en utilisant des TDM des rochers et quelques outils informatique. Les images 3D obtenues par modélisation sont reproductible en utilisant une méthode semi-automatisée. Elles permettent une visualisation de détails que l'on peut étudier sur les coupes scannographiques 2D. notre analyse quantitative (volumes et angles d'orientation) rejoint les données de la littérature et confirme la variabilité interindividuelle. Ces données de modélisation peuvent être utilisées pour une analyse plus fine de la physiologie de l'équilibre mais aussi pour comprendre le mécanisme physiopathologique de certains types de vertige (notamment du VPPB). Elles peuvent également être utilisées à des fins pédagogiques.

Bibliographie :

- 1 Perlmutter L, LEGENT F, VENDENBROUCK C. *cahiers d'anatomie ORL*. 4th ed. MASSON 1968.
- 2 Sakka L, Vitte E. Anatomie et physiologie du système vestibulaire. *Morphologie*. 2004;**88**(282):117–26.
- 3 Sennaroglu L, Saatci I. A New Classification for Cochleovestibular Malformations: *The Laryngoscope*. 2002;**112**(12):2230–41.
- 4 Nemzek WR, Brodie HA, Chong BW, *et al*. Imaging Findings of the Developing Temporal Bone in Fetal Specimens. . 1996;:11.
- 5 Melhem ER, Shakir H, Bakthavachalam S, *et al*. Inner Ear Volumetric Measurements Using High-Resolution 3D T2-Weighted Fast Spin-Echo MR Imaging: Initial Experience in Healthy Subjects. . 1998;:4.
- 6 Bradshaw AP, Curthoys IS, Todd MJ, *et al*. A Mathematical Model of Human Semicircular Canal Geometry: A New Basis for Interpreting Vestibular Physiology. *J Assoc Res Otolaryngol*. 2010;**11**(2):145–59.
- 7 Lee J-Y, Shin K-J, Kim J-N, *et al*. A Morphometric Study of the Semicircular Canals Using Micro-CT Images in Three-Dimensional Reconstruction: MORPHOMETRIC STUDY OF THE SEMICIRCULAR CANALS. *Anat Rec*. 2013;**296**(5):834–9.
- 8 Della Santina CC, Potyagaylo V, Migliaccio AA, *et al*. Orientation of Human Semicircular Canals Measured by Three-Dimensional Multiplanar CT Reconstruction. *J Assoc Res Otolaryngol*. 2005;**6**(3):191–206.
- 9 HASHIMOTO ST. Three-dimensional reconstruction and measurement of the human membranous semicircular canal. *Nippon Jibiin*. . 2003;:1.
- 10 Aoki S, Takei Y, Suzuki K, *et al*. Planer orientation of the bilateral semicircular canals in dizzy patients. *Auris Nasus Larynx*. 2012;**39**(5):451–4.
- 11 CHARPIOT_Anne_2010.pdf.

tableaux et figures :

1. Tableaux :

Tableau 1 volumes des CSC obtenus après segmentation.....	36
Tableau 2 angles formés par chaque paire de canaux et entre le CSC latéral et plan de frankfort	37
Tableau 3 surfaces de l'anneau creux obtenu sur coupes 2D TDM (osirix)	38
Tableau 4 angles d'ouverture des CSC sur le vestibule obtenus en coupes TDM 2D	39
Tableau 5 volume de l'oreille interne obtenu par segmentation semi automatique d'après Melhem et al [2]	42
Tableau 6 dimensions des CSC d'après Lee et al [4] hauteur et largeur	44

2. Figures :

Figure 1 interface ITK SNAP après ouverture et importation d'une TDM des rochers	23
Figure 2 label jaune choisi pour le CSC supérieur, le nom du label est édité pour porter le nom du canal.....	24
Figure 3 icone de l'outil segmentation semi-automatique.....	24
Figure 4 délimitation de la zone d'intérêt pour la segmentation du CSC supérieur ...	25

Figure 5 interface utilisateur de la segmentation semi-automatique	26
Figure 6 des bulles ont été définies tout au long du CSC supérieur.....	27
Figure 7 résultat de la segmentation semi automatique du CSC supérieur	28
Figure 8 résultat final de la segmentation semi automatique des CSC et de la crue commune.....	29
Figure 9 résultat final de la segmentation des CSC et de la crue commune.....	29
Figure 10 tabelau des volumes et intensités obtenue en fin de segmentation	30
Figure 11 plan de chaque CSC tel qu'il a été définit sur le logiciel paraview.....	31
Figure 12 plan du CSC latéral par rapport au plan de Franckfort.....	31
Figure 13 angles formés par chauqe paire de canaux	32
Figure 14 fenêtre du logiciel OSIRIX représentant TDM du rocher gauche	32
Figure 15 mode 3D MPR sur le logiciel OSIRIX	33
Figure 16 plan oblique passant par le CSC latéral	34
Figure 17 coupe à double obliquité passant par le plan du CSC postérieur.....	34
Figure 18 plan à double obliquité passant par le CSC supérieur	35
Figure 19 paramètres étudiant la taille des canaux semi circulaires d'après Lee et al [4] A : hauteur et largeur des CSC B : diamètre interne des CSC.....	43
Figure 20 dimensions des CSC d'après Lee et al [4] diamètre interne.....	44
Figure 22 variabilité des angles entres les CSC d'après Bradshaw et al [3]	45

Figure 22 angles formés par les paires decanaux semi circulaire d'après Lee et al [4]

.....47