



Royaume du Maroc المملكة المغربية

كلية الطب والصيدلة
+٠٢٤٧٠١١ | +٠١٤١١٤١٤ | +٠٥٠٥٥٠٥
FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE

ANATOMIE COMPAREE DE L'ORGANE STATO ACOUSTIQUE

MEMOIRE PRESENTE PAR :

Docteur CHARAI Ayoub
Né le 20/09/1988 à Fès

MEMOIRE DE FIN DE SPECIALITE

OPTION : OTO-RHINO-LARYNGOLOGIE

Sous la direction de :

Professeur EL ALAMI EL AMINE MOHAMED NOUR-DINE

Encadre par :

Professeur OUATTASSI NAOUAR

Session: juillet 2020

SOMMAIRE

Table des matières

I. INTRODUCTION..... 4

II. CLASSIFICATION DES ANIMAUX..... 5

 A) Classification scientifique (traditionnelle)..... 5

 B) Classification phylogénétique 5

III. ANATOMIE DE L'ORGANE STATO-ACOUSTIQUE 9

 A) Structure générale 9

 B) Oreille interne 10

 1) Composition..... 10

 2) L'oreille interne des poissons..... 15

 3) Amphibiens et reptiles 31

 4) Oiseaux et mammifères 36

 C) Le nerf stato-acoustique 40

 D) L'oreille moyenne 43

 1) Reptiles et oiseaux 44

 2) Les mammifères 52

 3) Transformation de la chaîne ossiculaire entre les reptiles et les mammifères..... 53

 4) Appareil original..... 58

 E) L'oreille externe 61

 F) Organe de l'équilibre des invertébrés..... 63

 1) Calamar et seiches..... 65

 2) La pieuvre 67

 3) Le crabe 67

 G) Système de la ligne latérale. 69

 1) Les cellules sensorielles 72

ANATOMIE COMPAREE DE L'ORGANE STATO ACOUSTIQUE

2) Répartition	72
3) Innervation	75
4) Développement	75
IV. CONCLUSION	Erreur ! Signet non défini.
V. BIBLIOGRAPHIE	78

I. INTRODUCTION

L'organe stato-acoustique, est un organe bilatéral, localisé dans la région temporale du crâne, dans l'os pétreux. Il assure les fonctions de l'audition et de l'équilibre, jouant un rôle primordial dans la survie des espèces.

L'audition fait partie des cinq sens, le sens de l'équilibre quant à lui peut être considéré comme notre sixième sens. Il joue un rôle dans au moins quatre fonctions vitales : le contrôle de la posture, les mouvements réflexes, la perception du mouvement du corps dans l'espace et le contrôle autonome.

De nombreuses études se sont attachées à étudier l'organe stato-acoustique humain et ce tant sur le plan anatomique que fonctionnel, en mettant en exergue les conséquences de son dysfonctionnement et le handicap qu'il entraîne sur la vie quotidienne.

Par ailleurs un intérêt particulier a été porté, par certains chercheurs, à comparer l'organe stato-acoustique de l'homme à celui d'autres espèces animales vivant dans des milieux différents.

Ainsi, au travers d'une revue de la littérature, nous nous sommes intéressés aux similarités et différences anatomiques et fonctionnelles de l'organe stato-acoustique chez l'homme et l'animal. Et pour se faire nous nous sommes intéressés à plusieurs espèces d'animaux à savoir : les mammifères, les oiseaux, les reptiles, les poissons, et les amphibiens.

Des différentes études menées, il ressort l'importance de cet organe. En effet il a été constaté son omniprésence chez toutes les espèces vertébrées.

Cependant l'étude de l'anatomie comparée de cet organe a permis de mettre en évidence des spécificités propres aux différentes espèces dépendantes de leur milieu de vie. Ainsi l'organe stato-acoustique diffère selon qu'il s'agisse d'une espèce terrestre ou maritime, par exemple.

II. CLASSIFICATION DES ANIMAUX

Les biologistes classent les êtres vivant à partir de nombreux critères : leur apparence, leur mode de déplacement, leur mode d'alimentation, présence de colonne vertébrale (classification scientifique), ou encore en fonction de l'évolution (classification phylogénétique) .

Nous allons rappeler brièvement la classification scientifique et phylogénétique vue qu'elles sont les plus utilisées pour classer les êtres vivants.

A) Classification scientifique (traditionnelle)

La grande diversité du monde animal a amené les scientifiques à établir des classifications complexes.

Cette classification traditionnelle est encore couramment utilisée, elle permet de diviser les êtres vivant en deux catégories : vertébrés et invertébrés.

Les vertébrés sont des animaux dotés d'une colonne vertébrale, Ils sont répartis en cinq grandes familles : les poissons, les reptiles, les amphibiens, les oiseaux, les mammifères.

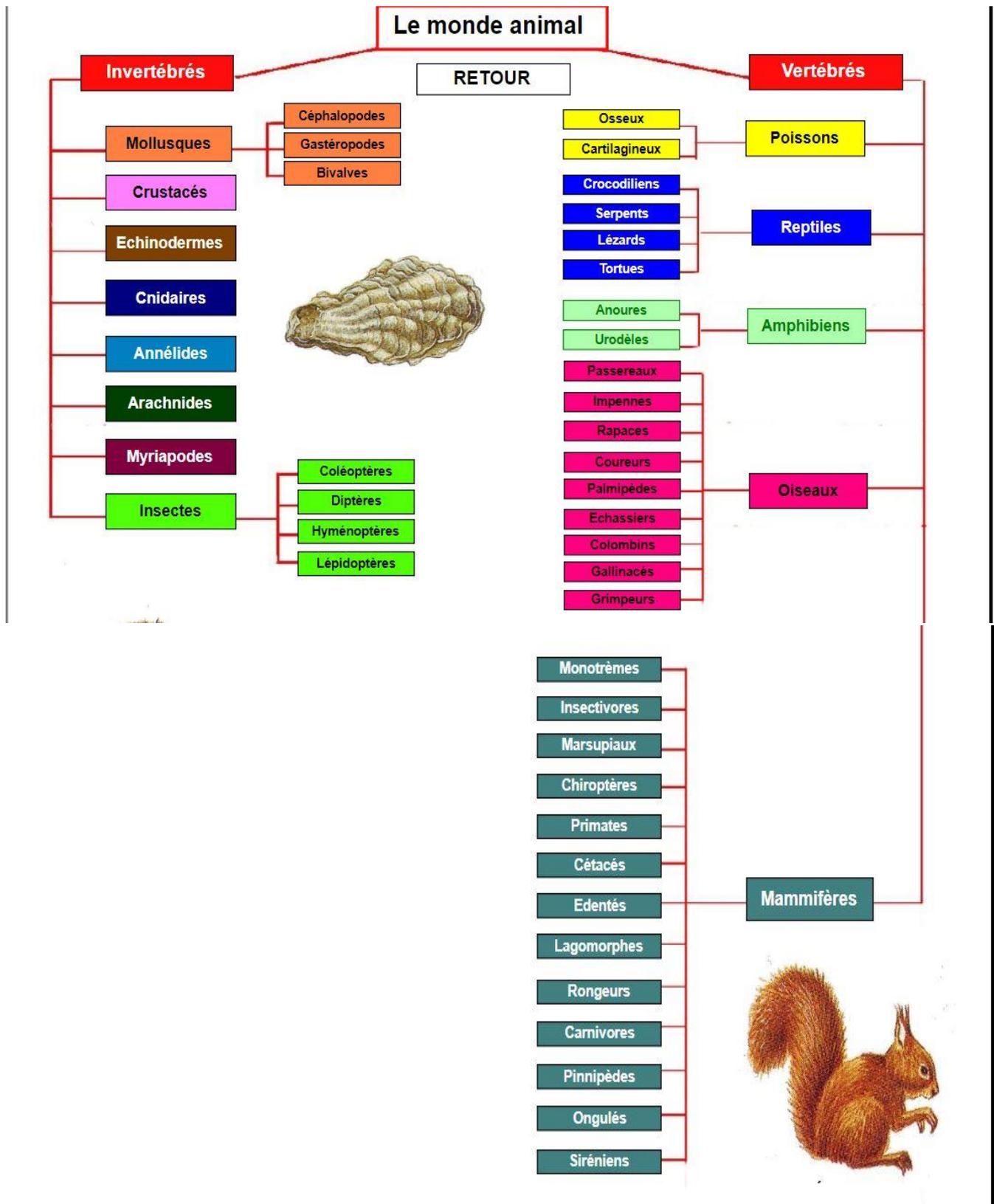
Les invertébrés sont des animaux sans colonne vertébrale. On en dénombre plus d'un million d'espèces différentes qui vivent sur toute la surface du globe et dans tous les milieux, notamment dans la mer, pour une partie d'entre eux. Ils sont répartis en trois grandes familles : les mollusques, les crustacés, les insectes.

B) Classification phylogénétique

La classification phylogénétique est un système de classification des êtres vivants qui a pour objectif de rendre compte des degrés de parenté entre les espèces et qui permet donc de comprendre leur histoire évolutive. Cette classification remplace désormais la classification traditionnelle.

La classification phylogénétique est fondée sur de nouvelles connaissances scientifiques en anatomie comparée, embryologie, biochimie, biologie moléculaire et même paléontologie...

ANATOMIE COMPAREE DE L'ORGANE STATO ACOUSTIQUE



CLASSIFICATION PHYLOGÉNÉTIQUE SIMPLIFIÉE

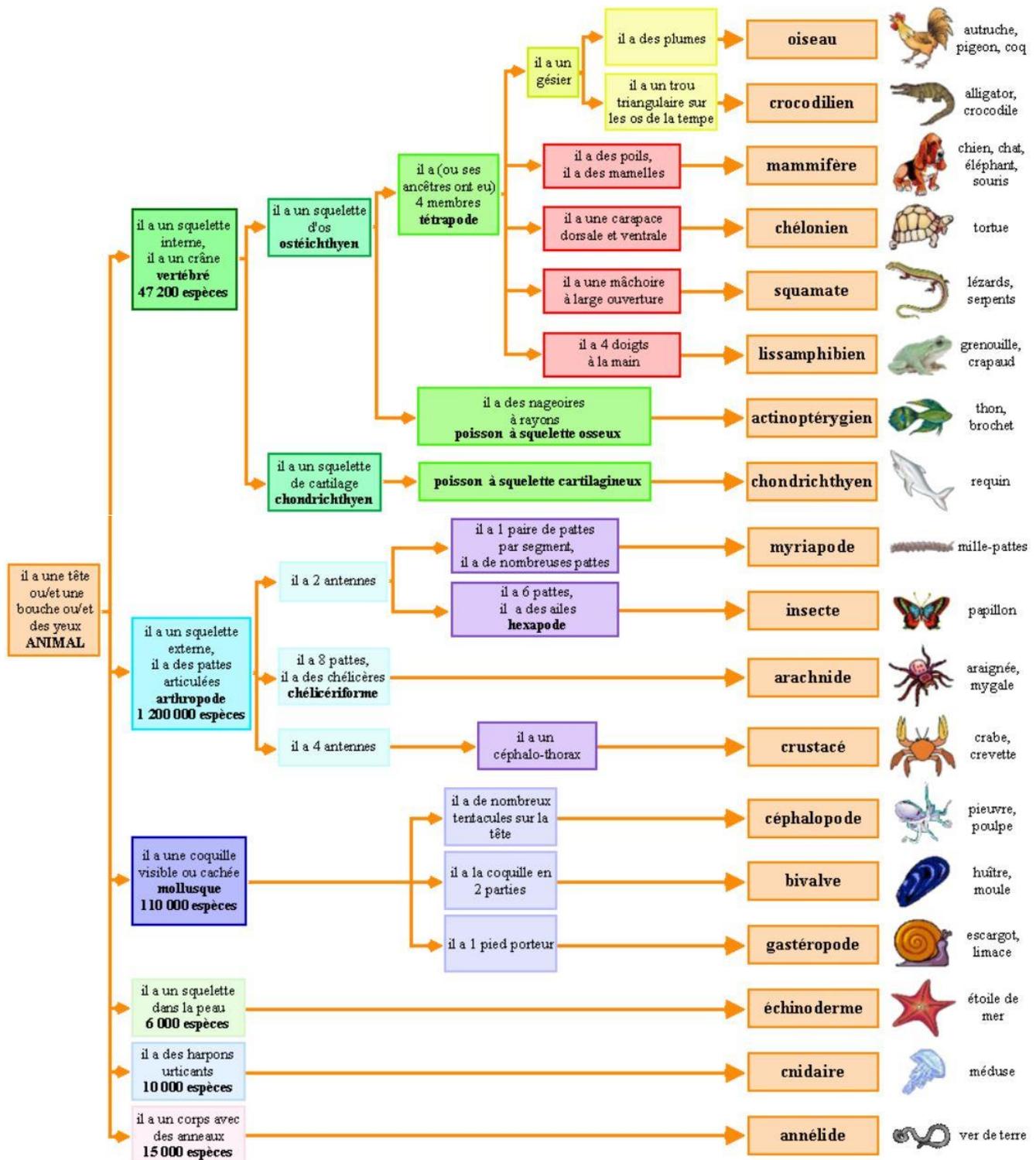


Figure 1: classification phylogénétique.

III. ANATOMIE DE L'ORGANE STATO-ACOUSTIQUE

A) Structure générale (1) (2)

L'oreille interne : représente la seule partie de l'organe stato-acoustique présente chez tous les vertébrés. Elle se présente comme un système complexe de sacs et de canaux limités par des parois molles, formant le labyrinthe membraneux, rempli d'un liquide clair, l'endolymphe (système endolymphatique). Il est limité par un épithélium différencié localement en plages sensorielles.

Ce labyrinthe membraneux est logé dans des cavités cartilagineuses ou osseuses un peu plus larges : le labyrinthe cartilagineux ou osseux. Entre le labyrinthe membraneux et le labyrinthe osseux existe un espace rempli de périlymphe.

L'oreille moyenne : avec le passage à la vie terrestre, chez les tétrapodes, s'y ajoute une oreille moyenne interposée entre le tégument (où elle l'affleure au niveau du tympan) et l'oreille interne. Elle contient une ou 3 pièces squelettiques qui assurent la transmission des vibrations du milieu extérieur qui atteignent le tympan, aux cellules sensorielles du labyrinthe membraneux via un système périlymphatique nouvellement différencié.

L'oreille externe : superficiel chez les amphibiens et la plupart des reptiles, le tympan s'enfonce dans un conduit auditif externe chez les crocodiliens, les oiseaux et les mammifères. Cette oreille externe se complète par un pavillon collecteur de sons uniquement chez les mammifères.

B) Oreille interne (3)

1) Composition (4) (1) (5)

Le labyrinthe membraneux, organe véritablement sensoriel, peut être divisé en deux parties :

- ❖ la partie statique ou d'équilibre comprenant l'utricule (petite outre), les trois canaux semi-circulaires et le saccule (petit sac). Cette partie informe le système nerveux sur les accélérations linéaires et angulaires de la tête dans l'espace ambiant. Elle est constante chez tous les vertébrés ;
- ❖ la seconde partie est acoustique. Elle n'existe morphologiquement que chez les vertébrés terrestres pour la détection des vibrations de l'air. C'est le canal cochléaire plus ou moins enroulé. Chez les poissons, ce canal cochléaire n'existe pas et on ne trouve qu'un petit diverticule du saccule appelé la lagena. Le labyrinthe des poissons est cependant sensible aux vibrations de l'eau ; ce qui leur permet de détecter la présence de leurs congénères, prédateurs, pêcheurs ou proies et la distance à laquelle ils se trouvent.

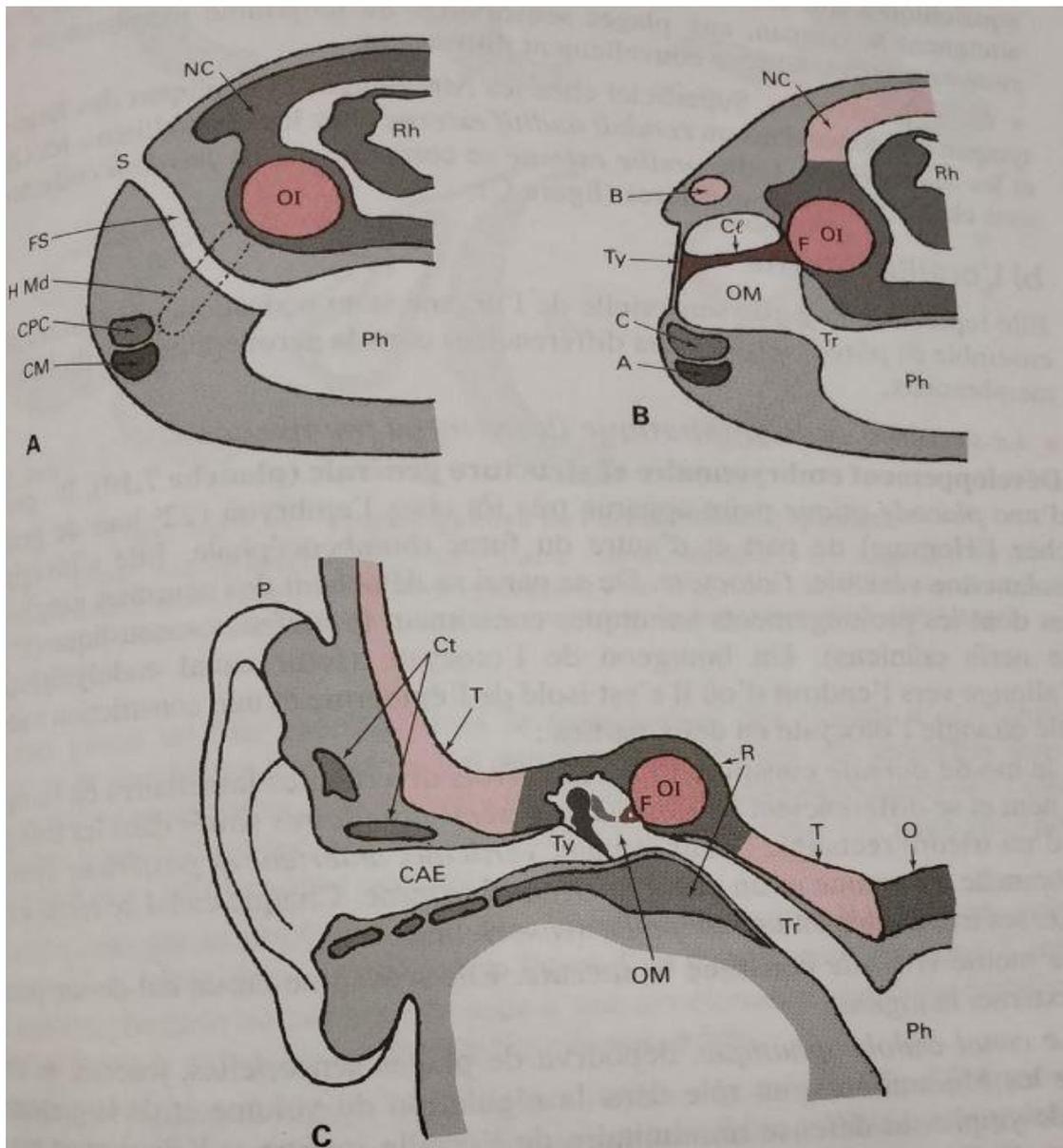


Figure 2 : organisation générale de l'organe stato-acoustique. Coupes schématiques

A : poisson (Elasmobranch). **B** : Tétrapode non mammalien (lézard). **C** : mammifère (homme).

A : Articulaire ; B : barre temporelle supérieure ; C : carré ; CAE : Conduit auditif externe ; Ct : cartilage du pavillon et du conduit auditif externe ; Cl : columelle tympanique ; CM : cartilage de Meckel ; CPC : cartilage ptérygocarré ; F : fenêtrée ovale ; FS : fente spiraculaire ; HMd : hyo-mandibulaire ; NC : neurocrâne ; O : occipital ; OI : oreille interne ; OM : oreille moyenne ; P : pavillon ; Ph : pharynx ; Rh : Rhombencéphale ; R : Rocher du temporal ; S : spiracle ; T : temporal ; Tr : Trompe d'eustache ; Ty : Tympan.

Le labyrinthe membraneux présente trois types de mécanorécepteurs situés dans l'épithélium qui le limite. Ces récepteurs sont groupés dans des zones précises appelées plages sensorielles :

- ❖ les macules, ou récepteurs d'accélération rectiligne, situés dans l'utricule et le saccule de tous les vertébrés et dans la lagena des poissons. La cupule est chargée de fines concrétions calcaires ou otoconies ;
- ❖ les crêtes, ou récepteurs d'accélération rotatoire, situées dans les ampoules des canaux semi-circulaires de tous les vertébrés. Elles sont dépourvues d'otoconies ;
- ❖ la papille, ou récepteur acoustique, n'existe que chez les vertébrés aériens. Elle est appelée papille basilaire chez les amphibiens et les reptiles, et située dans la lagena. Elle s'allonge en organe de Corti chez les crocodiliens, les oiseaux et les mammifères. Les cellules auditives de l'organe de Corti des mammifères sont exceptionnellement dépourvues de kinétocil.

Les récepteurs du saccule et de l'utricule peuvent être considérés comme représentants d'un type particulièrement primitif puisque l'essentiel de leur structure se retrouve dans les organes statocytaires des invertébrés aussi rudimentaires que les cœlentérés par exemple (statocystes des cténaïres et des mollusques).

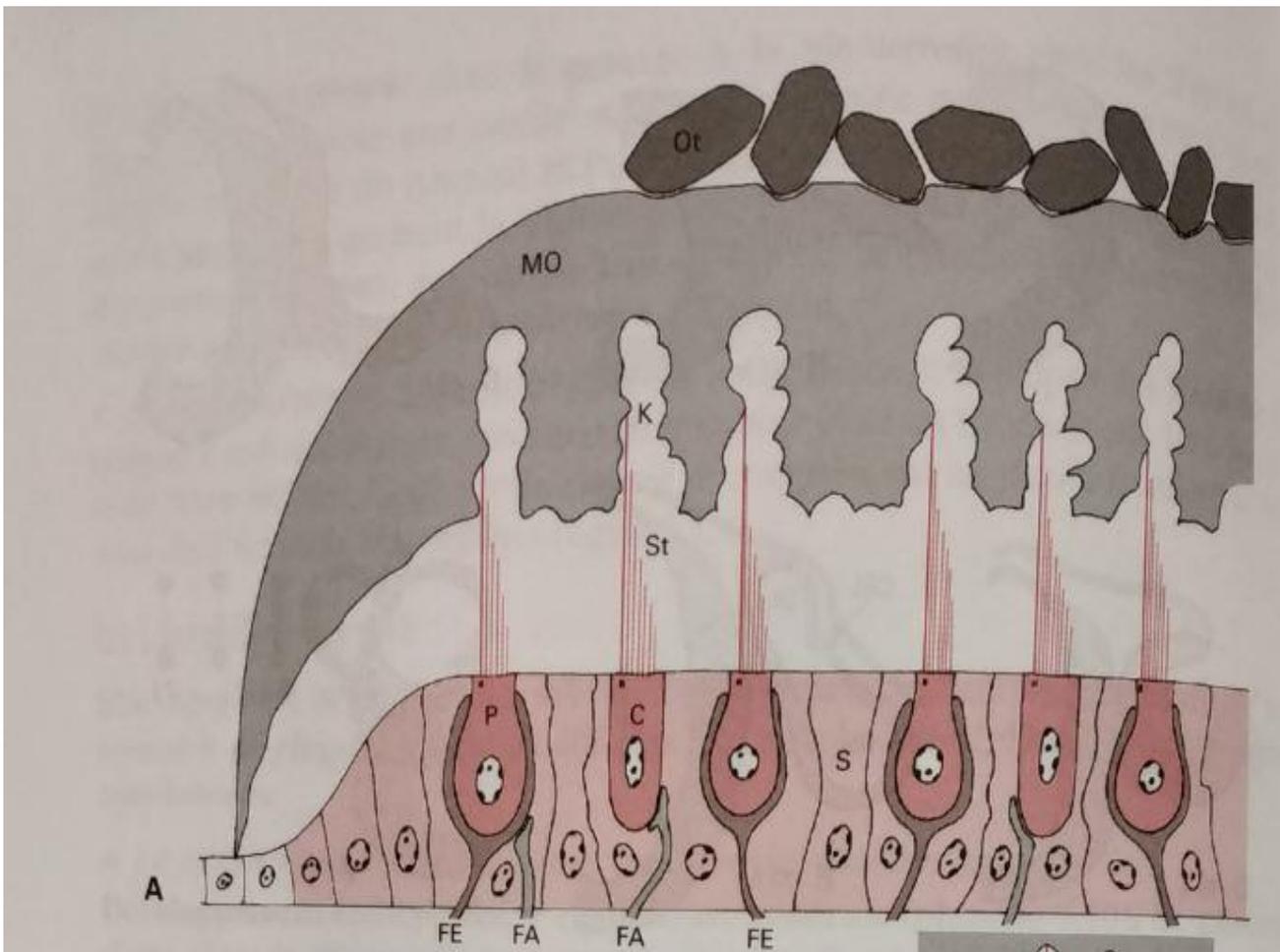


Figure 3 :Macule sacculaire primate

FA,FE : fibre afférente, efférente ; MO :Membrane otoconiale ; Ot : otoconies

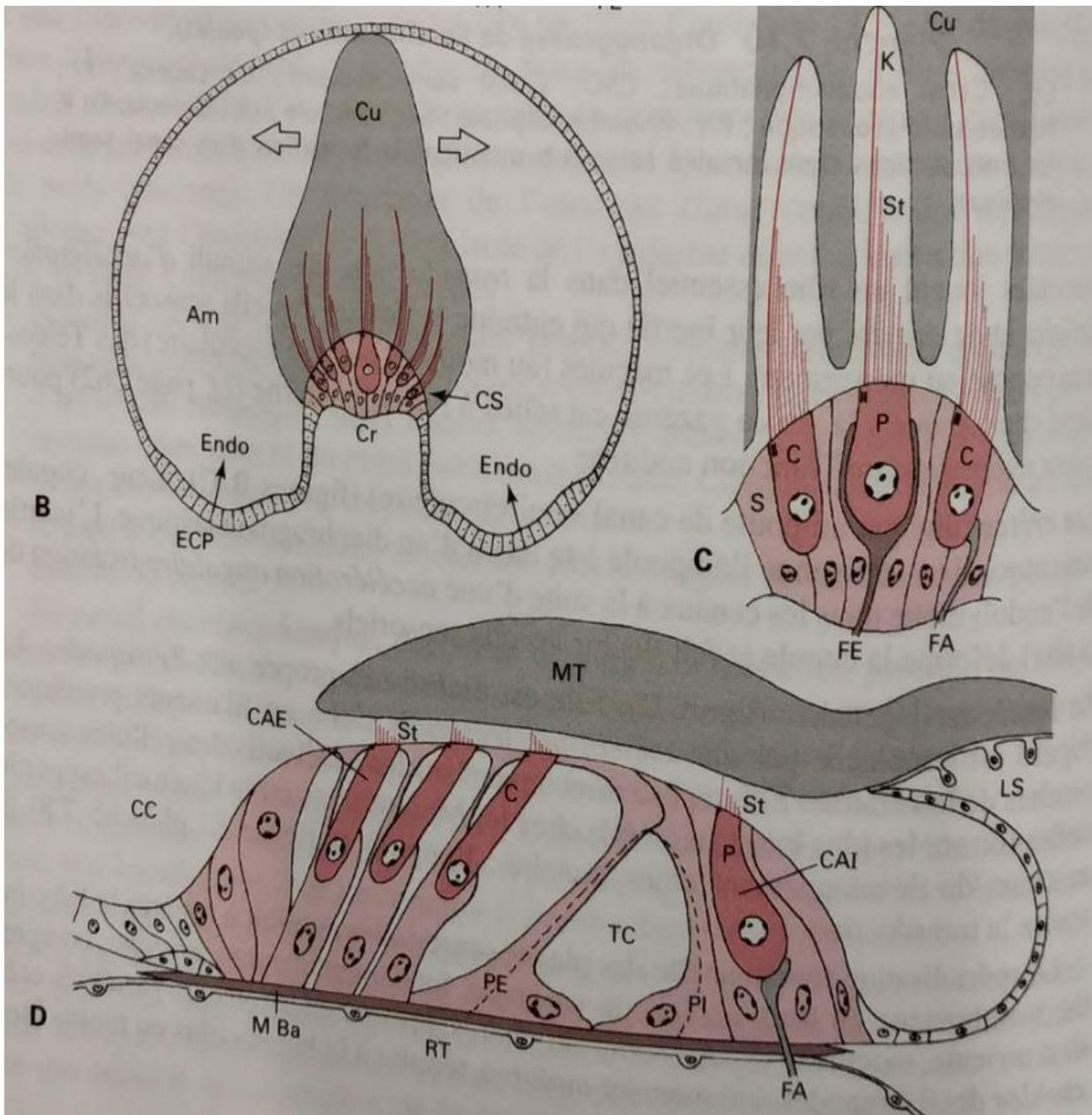


Figure 4 coupes schématiques des plages sensorielles

B : crête ampullaire (grenouille) ; **C** : détail de la crête ; **D** : papille basilaire (organe de corti de primate).

Am : Ampoule de canal semi-circulaire ; CC : canal cochléaire ; Cr : crête ampullaire ; CS : Cellule sensorielle ; Cu : cupule et ses déplacements (flèches) ; ECP : Epithélium du canal endolymphatique sécréteur de l'endolymphe (Endo) ; FA,FE : fibre afférente, efférente ; K :Kinétocil ; LS :Limbe spira ; MBa,MO,MT : Membranes basilaire, otoconiale, tectrice ; Ot : otoconies ; P : cellule en poire ; PE,PI : piliers de corti externe, interne ; RT : Rampe tympanique ; S : Cellule de soutien ; St : stéréocils ; TC : tunnel de corti.

2) L'oreille interne des Poissons (6) (7)

On peut classer les poissons (vertébrés aquatique) en trois grands groupes :

- Les agnathes (sans mâchoire)
- Les poissons cartilagineux
- Les poissons osseux

a) Les agnathes : (8)

Le labyrinthe membraneux des agnathes ou vertébrés dépourvus de mâchoires (encore appelés cyclostomes : à bouche en cercle) est rudimentaire.

En effet, chez la :

- myxine, il est réduit en un seul canal semi-circulaire, mais il possède deux ampoules et peut donc être considéré comme la fusion de deux canaux. Il est associé à une macule, l'ensemble est souvent appelé : tore.
- Les lamproies ont une chambre ciliée non différenciée en utricule, saccule et lagena mais possédant les macules et seulement deux canaux semi-circulaires verticaux, antérieur et postérieur, mais sans canal latéral.

Il est impossible de préciser s'il s'agit dans ces deux cas d'un stade primitif ou d'une spécialisation devenue impasse évolutive.

b) Chez le poisson cartilagineux ou chondrichthyens :

Le labyrinthe de la lignée des poissons cartilagineux, comme celui du requin, possède également des canaux antérieur, postérieur et latéral, ceux-ci ayant la même orientation dans la tête que leurs homologues du labyrinthe des poissons osseux. En revanche, il n'y a pas de crus commune entre les canaux antérieur et postérieur. Le canal postérieur est à part, communiquant avec le saccule, et ce sont les canaux antérieur et horizontal qui sont reliés par une sorte de crus commune. Ces différences notables de structure labyrinthique des lignées des poissons osseux et cartilagineux conduisent à se demander si la phylogenèse des canaux horizontaux chez les vertébrés est monophylétique ou polyphylétique

ANATOMIE COMPAREE DE L'ORGANE STATO ACOUSTIQUE

Le labyrinthe membraneux, enfermé dans un labyrinthe cartilagineux (capsule otique), est complet avec un petit diverticule ou lagena, rudimentaire et sans papille. Le canal endolymphatique né du saccule et de l'utricule s'ouvre à l'extérieur par un orifice cutané. Cette particularité a permis à Portman en 1927 de réaliser ses expériences. L'oblitération du canal entraîne des troubles de l'équilibre du requin.

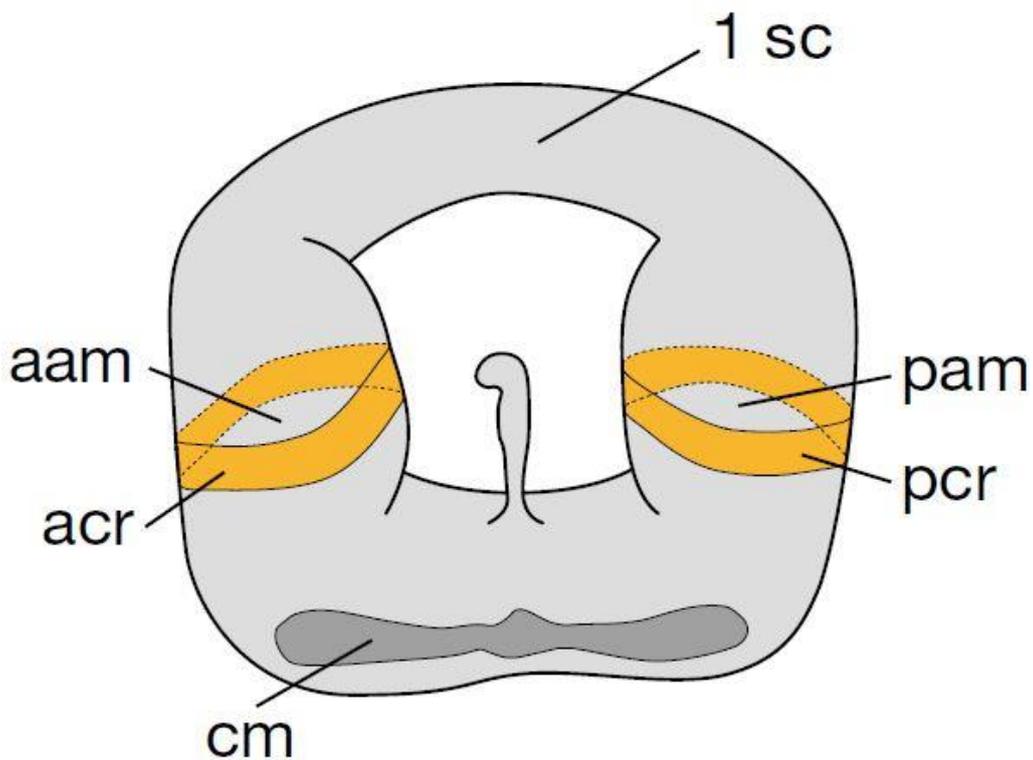


Figure 5: labyrinthe membraneux des myxines

SC : canal semi-circulaire ; aam,pam : ampoule antérieure, postérieure ; acr,pcr : crête antérieure, postérieure ; cm : macule

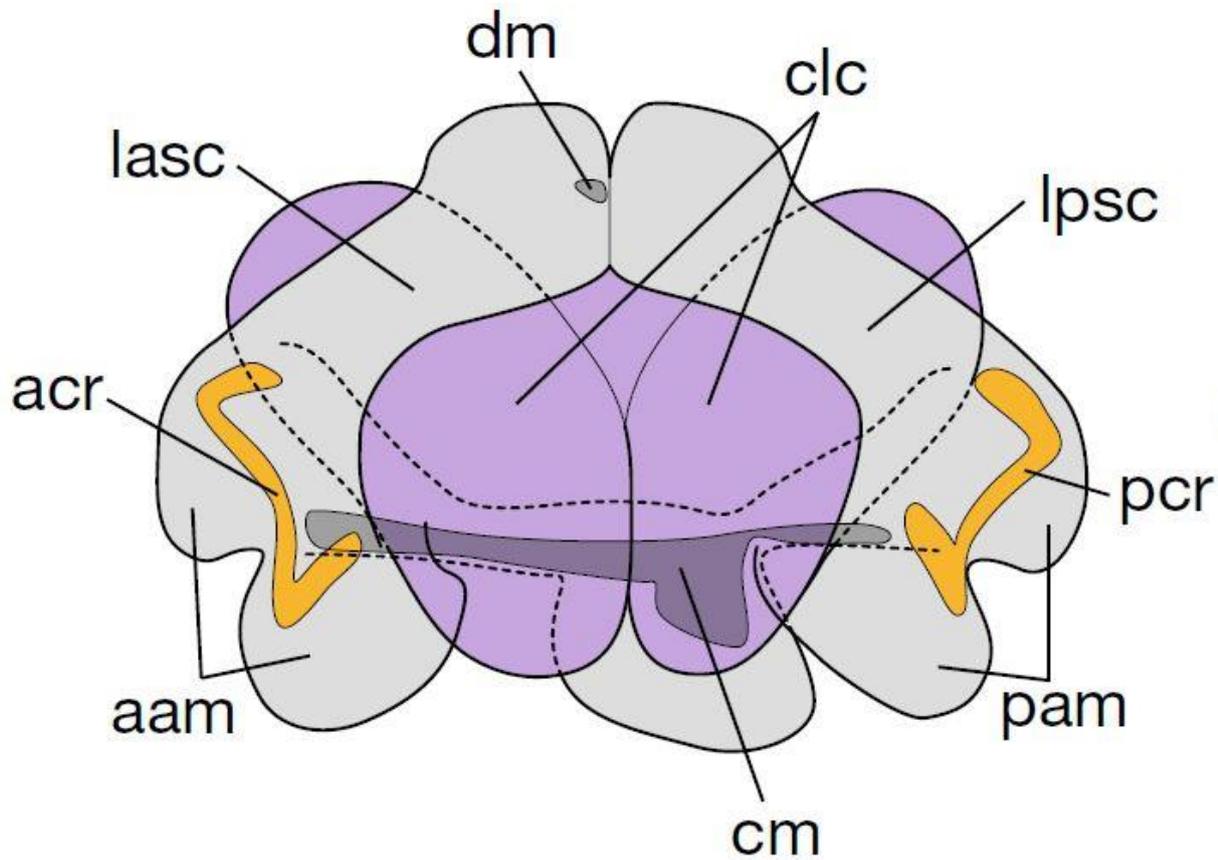


Figure 6: labyrinthe membraneux des lamproies

SC : canal semi-circulaire ; aam,pam : ampoule antérieur, postérieur ; acr,pcr : crête antérieure, postérieure ; cm : macule

lasc, ipsc : canal vertical antérieur, postérieur ; acr,pcr : crête ampullaire ; cm : macule lagenaire ; clc : chambre ciliée ; aam,pam : ampoule antérieure, postérieure

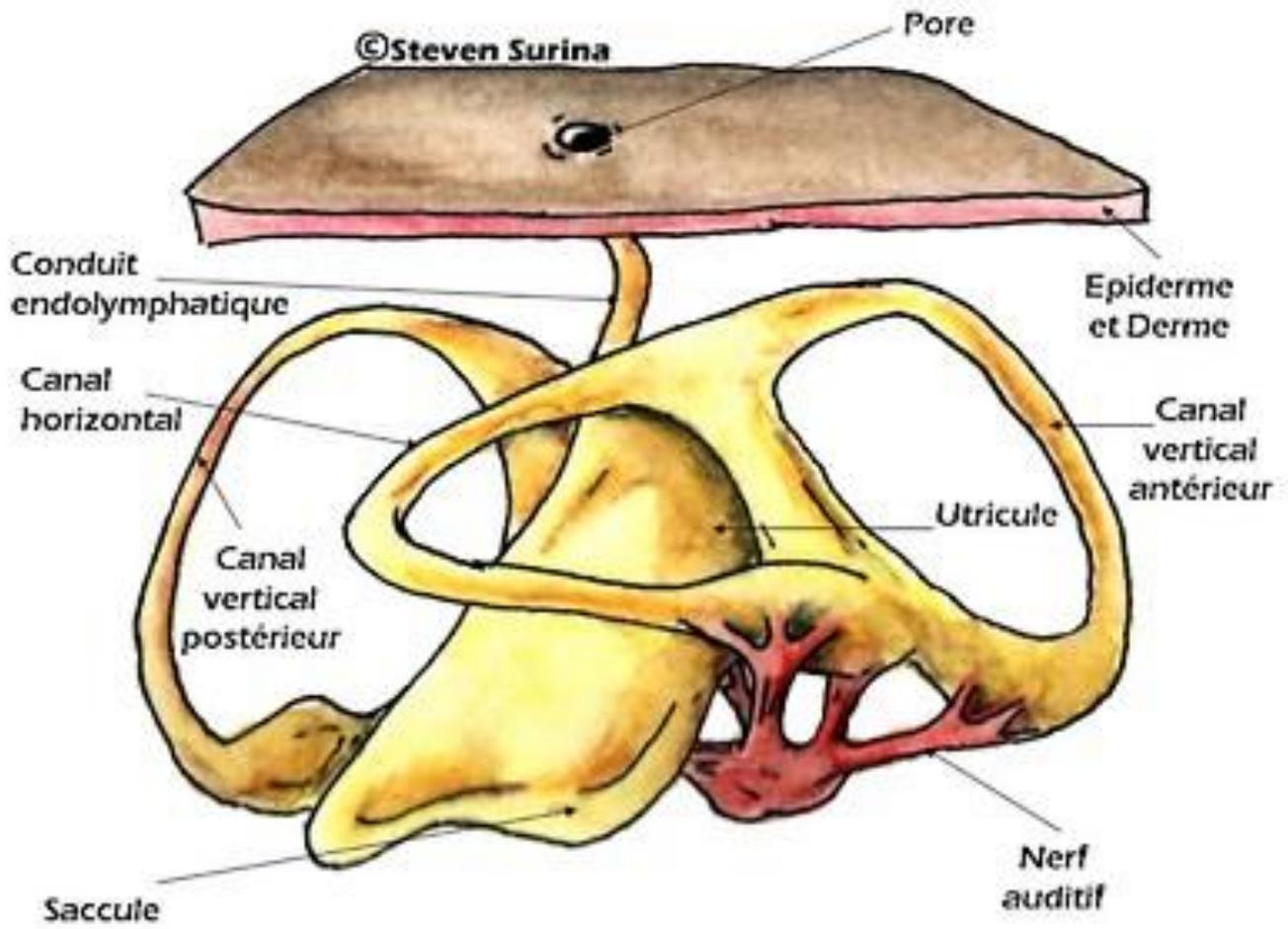


Figure 7 : oreille interne d'un requin (chondrichthyens)

c) Chez les poissons osseux, ou ostéichtyens (9) (10) (11)

L'observation d'un labyrinthe typique de la lignée des poissons osseux, montre qu'il est constitué de trois canaux, antérieur, postérieur et horizontal. Les canaux antérieur et postérieur forment une crux commune, autrement dit, ils partagent un segment de leur structure circulaire.

L'importance des divers constituants peut varier d'une espèce à l'autre, mais ils sont tous présents. La lagena est rudimentaire et toujours dépourvue de papille acoustique.

Concernant les organes otolithiques, tous les vertébrés, à l'exception des poissons, possèdent des macules couvertes d'une membrane otoconiale faite de fines et nombreuses concrétions calcaires (otoconies). Par ailleurs, il n'existe chez les poissons osseux que trois otolithes souvent volumineux et de formes caractéristiques de l'espèce baignant dans l'endolymphe. Leur croissance saisonnière permet de préciser l'âge du poisson.

L'otolithe de la macula de l'utricule est le lapillus, celui de la macula du saccule est le sagitta, celui de la macula de la lagena est l'asteriscus. La macula de l'utricule et de la lagena sont verticales. Ces macules otolithiques ont deux et probablement trois fonctions.

- Au repos, ce sont des récepteurs statiques informant le système nerveux central du poisson sur la position de son corps dans un espace à trois dimensions en rapport avec la pesanteur. Ils permettent de placer les yeux et les nageoires en bonne position.
- En second lieu, au cours des déplacements, ils informent avec les canaux semi-circulaires sur les accélérations linéaires et angulaires qui sont à la base de mouvements réflexes.

- En troisième lieu, certains organes otolithiques sont stimulés par les vibrations de l'eau transmises directement par le squelette céphalique. Chez de nombreuses espèces, ils ont un rôle auditif dans l'eau tout à fait remarquable. Ils permettent de détecter la distance et la nature de l'émetteur de ces vibrations (congénère, prédateur, pêcheur, proie).

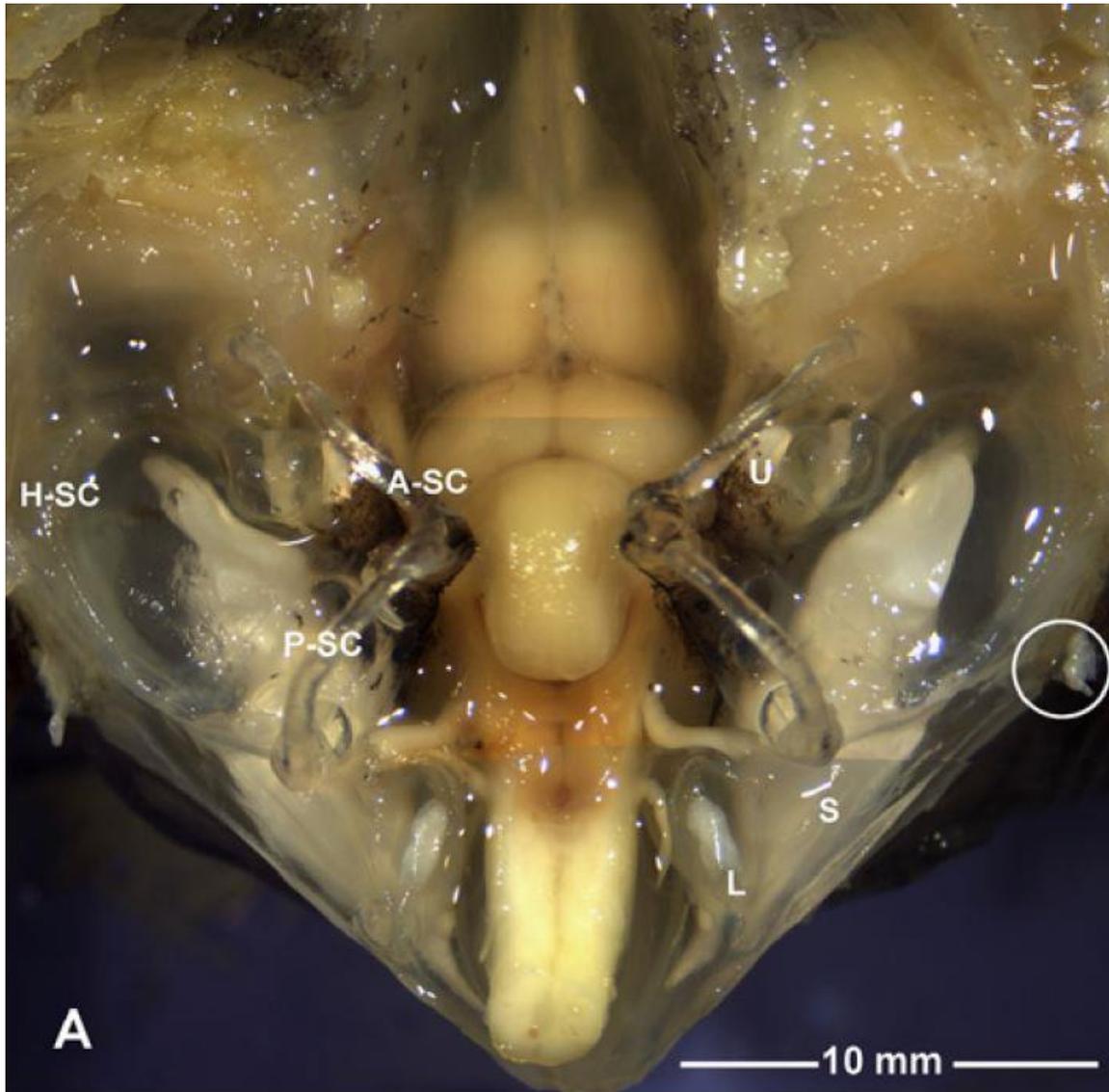


Figure 8: Vue dorsale des oreilles internes après avoir retiré une partie du crâne et du cartilage.(poisson : Antimora rostrata)

H-Sc, A-Sc, P-Sc : canal semi circulaire horizontal, antérieur, postérieur ; U : utricule ; S : saccule ;

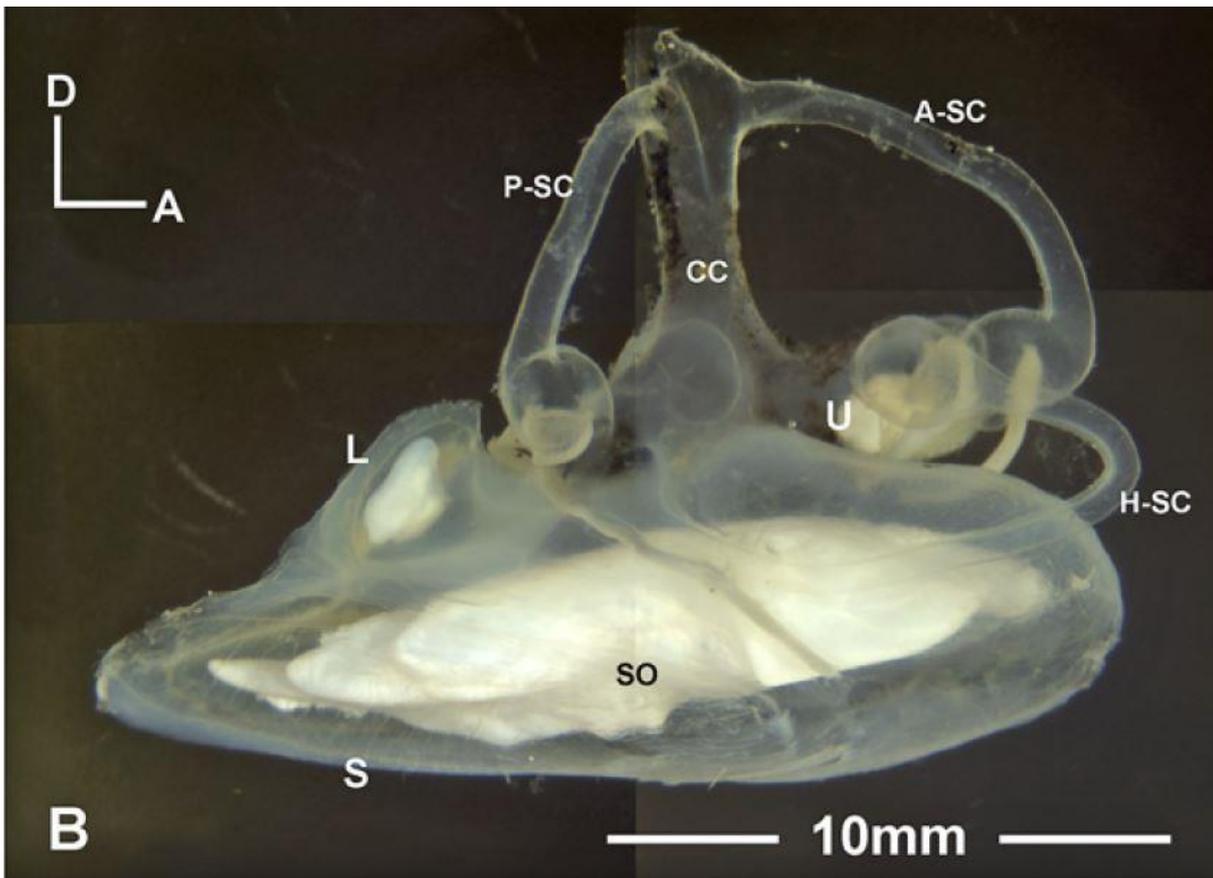


Figure 9: oreille interne d'*Antimora rostrata*

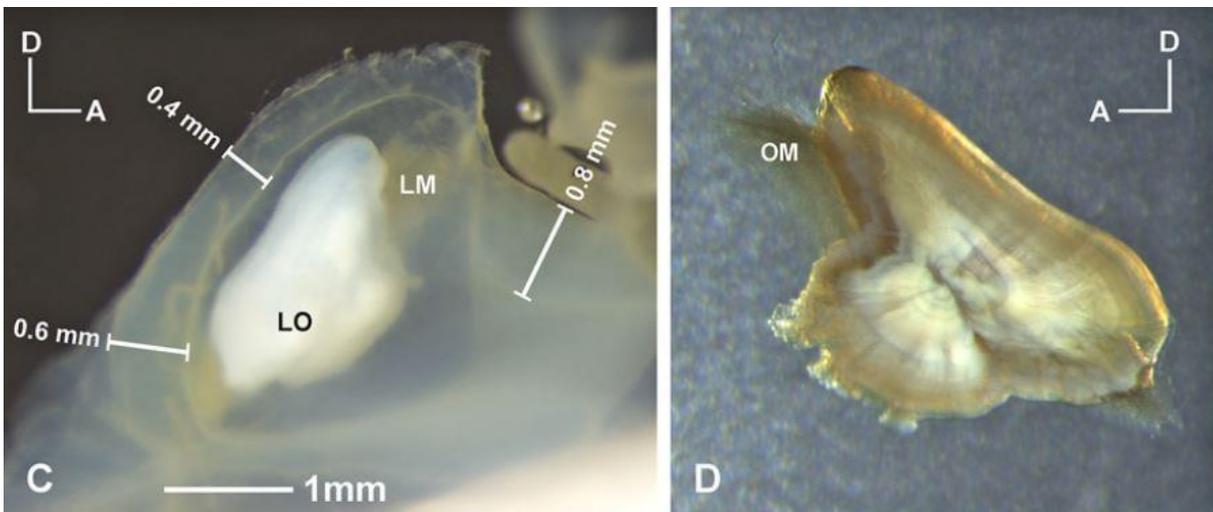


Figure : oreilles intérieures d'*Antimora rostrata*

B : Vue latérale d'une oreille interne droite avec les trois otolithes clairement présents dans leurs poches ; C : Vue latérale de la lagena droite ; D : Otolithe lagénaire gauche et membrane otolithique extraites de la macule lagénaire après fixation

H-Sc, A-Sc, P-Sc : canal semi circulaire horizontal, antérieur, postérieur ; U : utricule ; S : saccule ; L : lagéna ; cc : crus commune ; SO : otolithe sacculaire ; LM : macule lagénaire ; LO : otolithe lagénaire ; OM : membrane otolithique

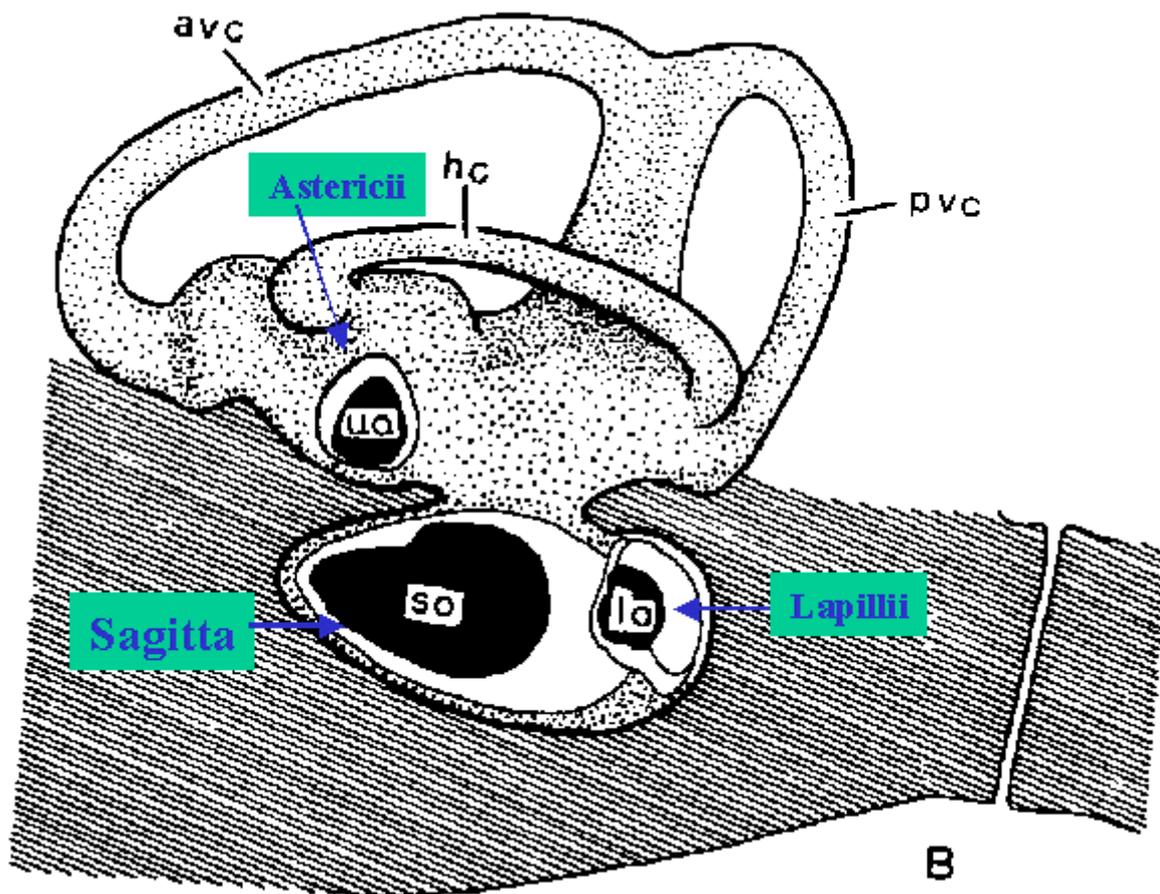


Figure 10: les otolithes des ostéichtyens

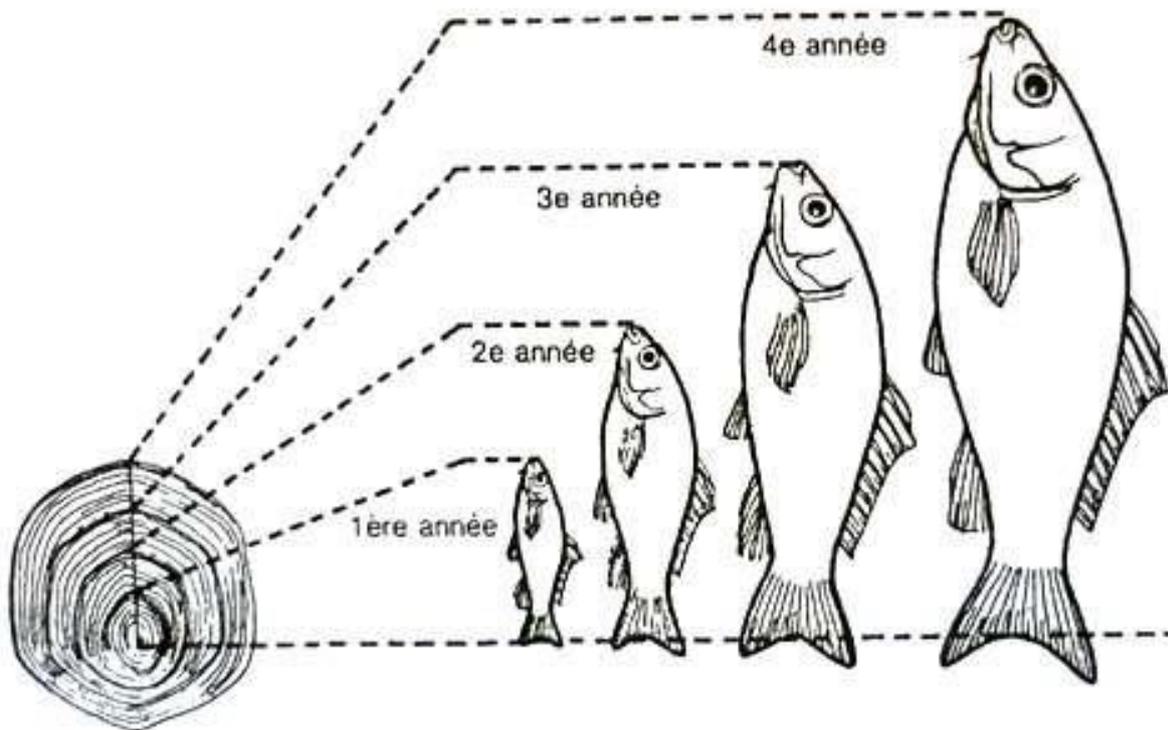


Figure 11: Évaluation de la croissance d'un poisson en fonction de celle d'une écaille

d) Connexion entre la vessie gazeuse et le labyrinthe membraneux : appareil de détection des vibrations de l'eau : (9) (12)

Les poissons utilisent pour entendre, les lignes latérales (que nous allons développer par la suite) et les organes à otolithes, aidés, chez certaines espèces, par la vessie gazeuse.

La transmission des ondes se fait directement via le squelette crânien. Cependant, quelques espèces associent la vessie gazeuse (cavité remplie d'air) à l'oreille interne pour améliorer leurs performances auditives, en utilisant deux appareils :

i. Connexion entre la vessie gazeuse et le labyrinthe membraneux (9) (1)

Se trouve chez les clupéiformes (hareng, sardine, saumon, truite, brochet). La transmission se fait par un canal très fin né de la vessie gazeuse et bifurqué à son extrémité distale de chaque côté en deux bulles remplies elles aussi de gaz. Ce sont les bulles ptérotique et prootique. Elles entrent en contact directement avec le labyrinthe membraneux. La vessie gazeuse forme une caisse de résonance stimulée par les vibrations aquatiques. Elle transmet ces variations de pression au labyrinthe. Ce canal peut se collaber sous l'effet de la pression en profondeur. L'origine du gaz contenu dans la vessie gazeuse semble être l'air dégluti par le poisson lorsqu'il se trouve en surface. Cet air pénètre dans la vessie grâce à un canal valvulé qui la relie à l'estomac. Cet air est conservé pendant des mois. Il est à noter que cette vessie gazeuse n'a aucun rôle dans la flottabilité du poisson et qu'elle n'est donc pas natatoire mais auditive. Elle permet également d'informer le labyrinthe sur la profondeur.

ii. Appareil de WEBER (13) (1)

Le second appareil détecteur des vibrations dans l'eau se trouve chez les cypriniformes (carpe, barbeau, gardon, goujon, tanche, vairon, gymnote, silure...). Il

est formé par une chaîne de quatre osselets, ou osselets de Weber (qui sont les trois premières vertèbres modifiées). Ces osselets, articulés entre eux, mettent en connexion la vessie gazeuse avec le labyrinthe membraneux. Ce sont, à partir de la vessie gazeuse, le tripus, l'intercalarium, le claustrum et le scaphium. Ce dernier vient au contact du sinus impair de l'espace périlymphatique qui entoure un canal transverse unissant les deux saccules droit et gauche. Les cypriniformes réagissent à des sons entre 60 et 5 000 Hertz. Les vairons peuvent être entraînés à discerner des notes « gazouillées » séparées par un quart de ton.

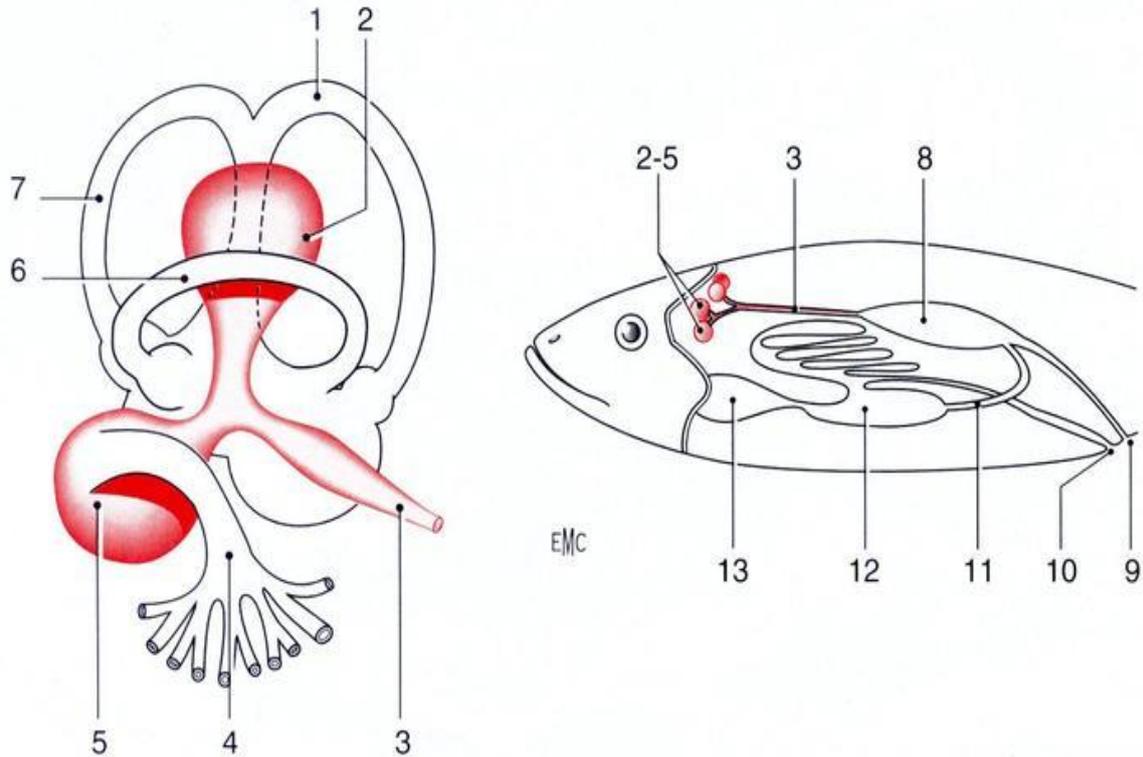
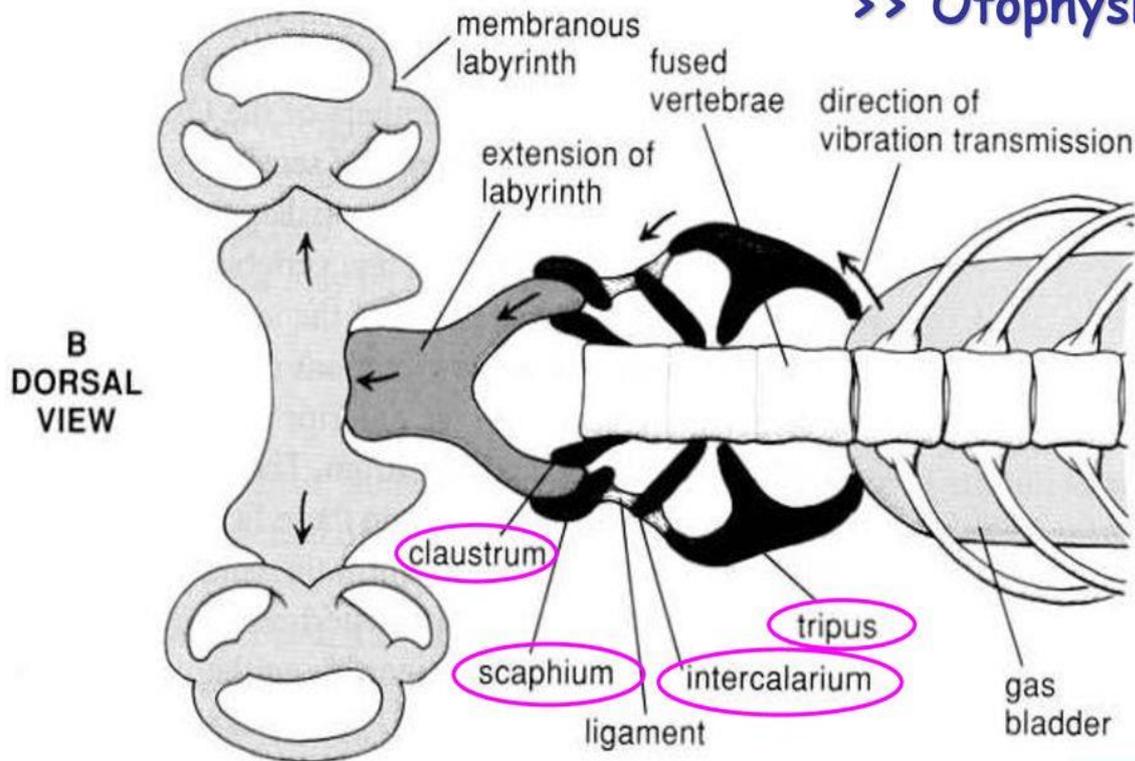


Figure 12: communication entre vessie gazeuse et labyrinthe membraneux chez les clupéiformes

- 1. canal vertical postérieur 2. bulle ptérotique 3. diverticule de la vessie gazeuse
- 4. système de la ligne latérale 5. bulle prootique 6. canal horizontal
- 7. canal vertical antérieur 8. vessie gazeuse 9. orifice externe de la vessie gazeuse
- 10. anus 11. canal pneumatique 12. Estomac 13. pharynx

Weberian Apparatus

>> Otophysi



HO#55

Figure 13:: appareil de weber

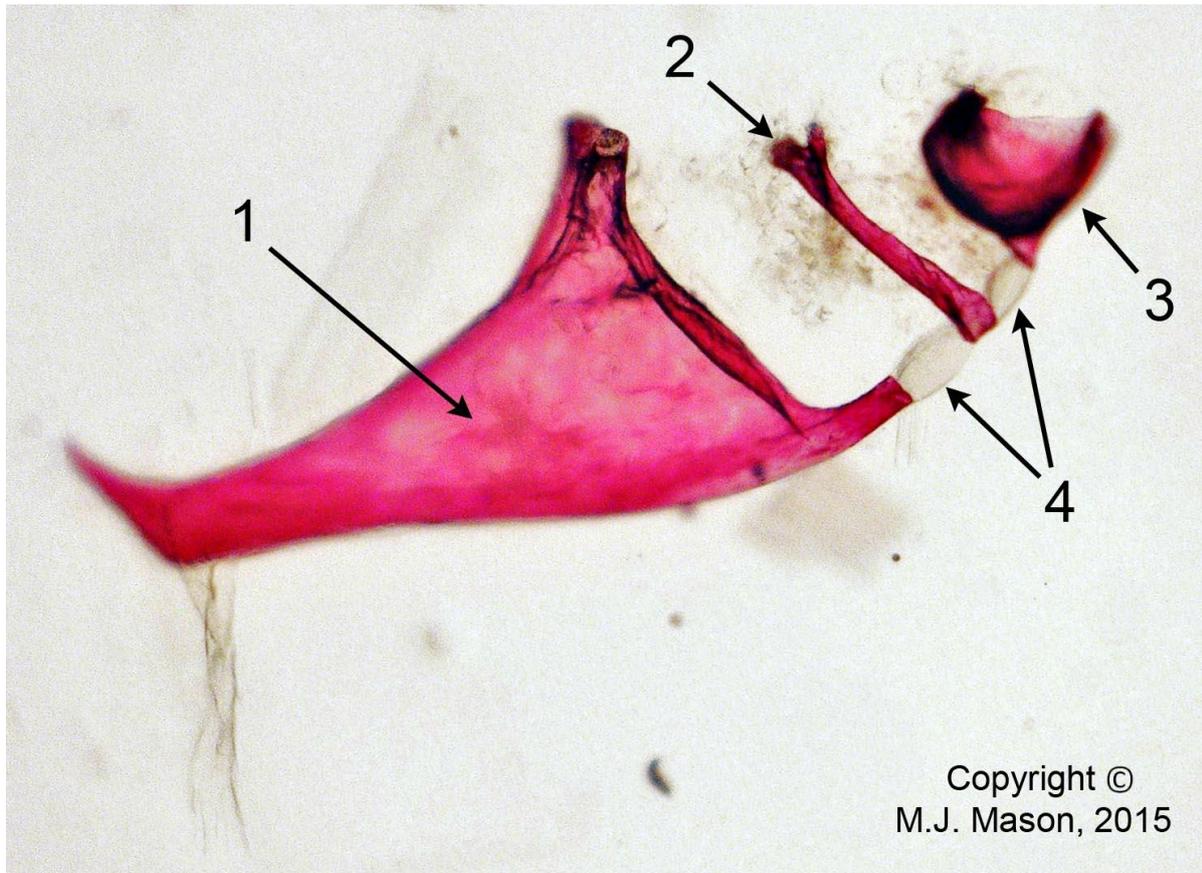


Figure 14: photomicrographie des osselets de weber après dissection

1 : tragus ; 2 : intercalarium ; 3 : scaphium ; 4 : ligaments inter-ossiculaire

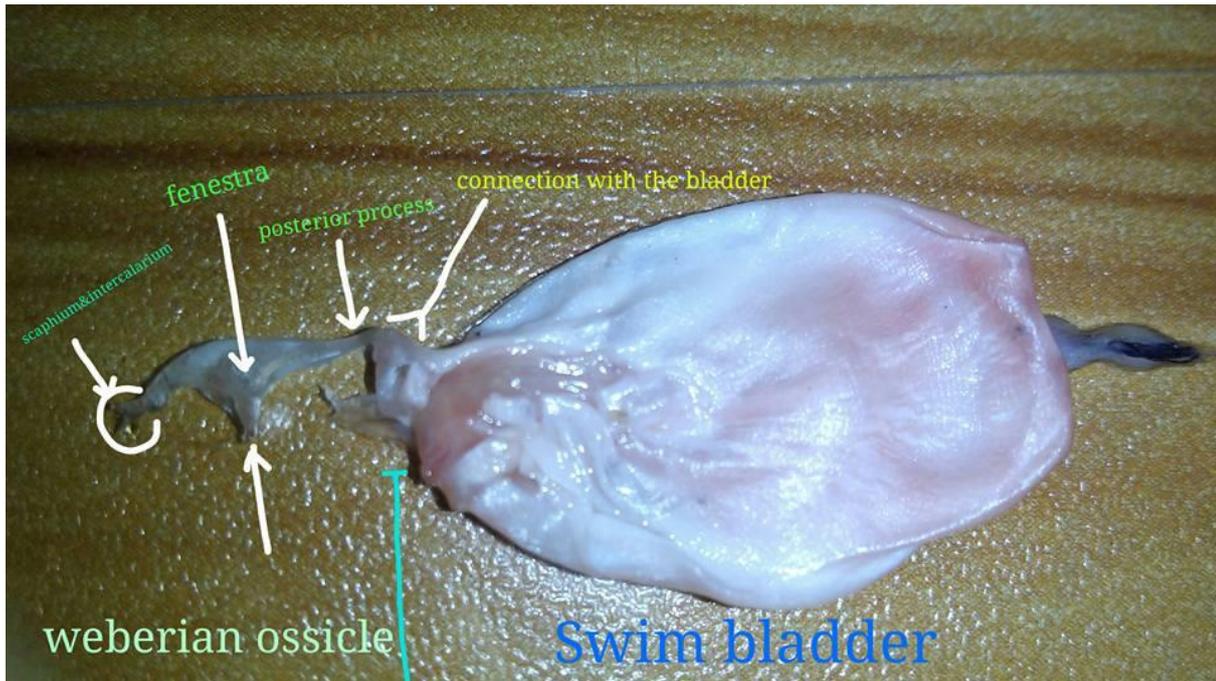


Figure 15: connexion entre l'appareil de weber a la vessie gazeuse après dissection

3) Amphibiens et reptiles (14) (15) (4)

Avec les tétrapodes et le passage à la vie aérienne apparaît la papille acoustique dans la lagena. Celle-ci est encore peu développée et présente encore une macula lagenaire.

Chez les amphibiens, il existe une deuxième papille auditive ; la papille amphibiorum située dans l'utricule. Les amphibiens sont ainsi les seuls vertébrés à posséder deux organes sensoriels auditifs.

Autour de la lagena, les espaces périlymphatiques, formés de tissu conjonctif gorgés d'un liquide ou périlymphe, se différencient en un canal périlymphatique. Le tissu conjonctif disparaît et laisse place à un véritable canal rempli de périlymphe. Ce canal est séparé du reste des espaces périlymphatiques par une membrane limitante formée de tissu conjonctif. Le canal périlymphatique chez les reptiles s'étend de la fenêtre ovale, creusée sur la face externe du labyrinthe osseux et fermée par la columelle tympanique, jusqu'à la fenêtre ronde fermée par une membrane fibreuse ou tympan secondaire. La partie initiale, dilatée, du canal périlymphatique s'appelle la citerne périlymphatique..

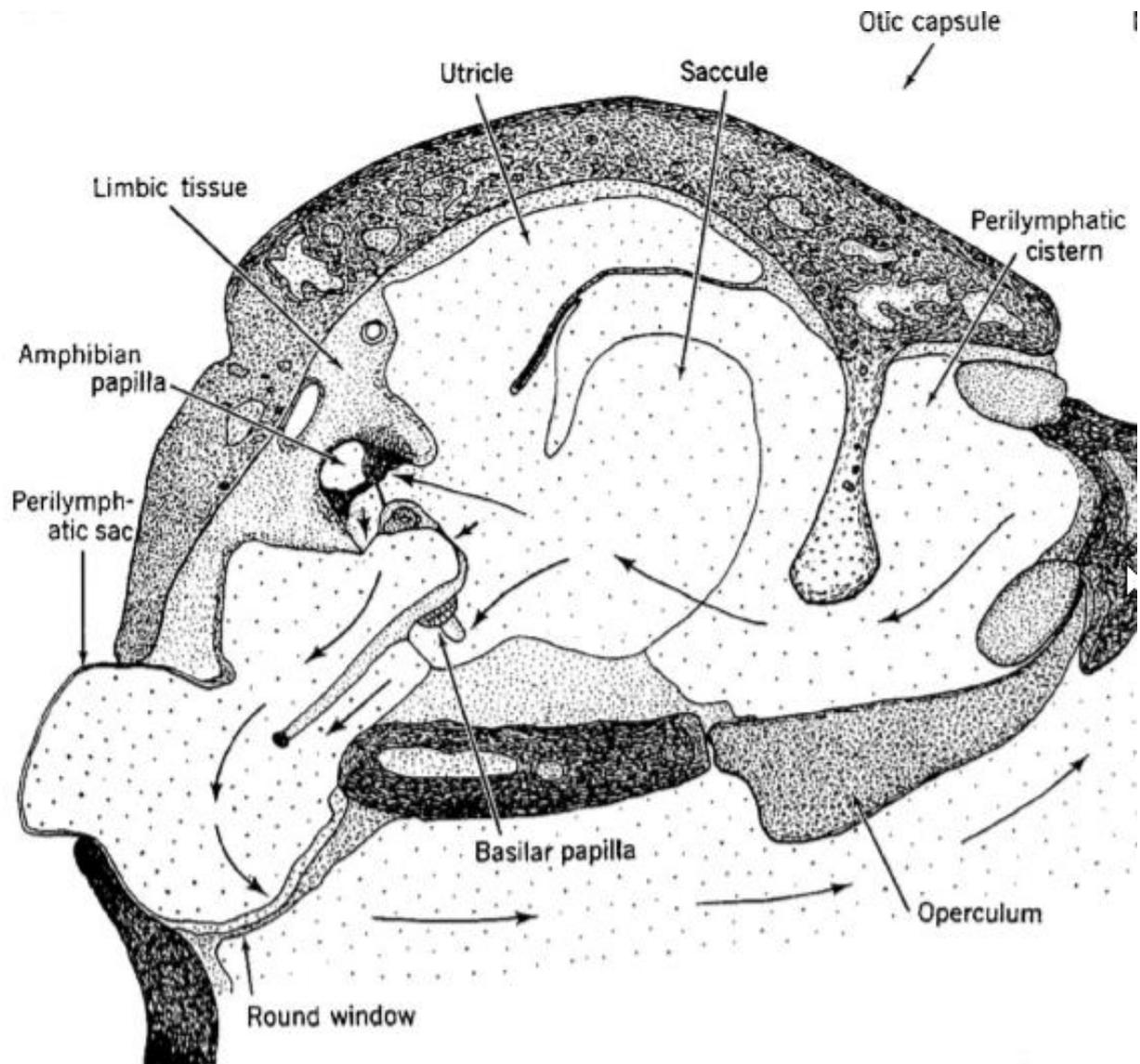
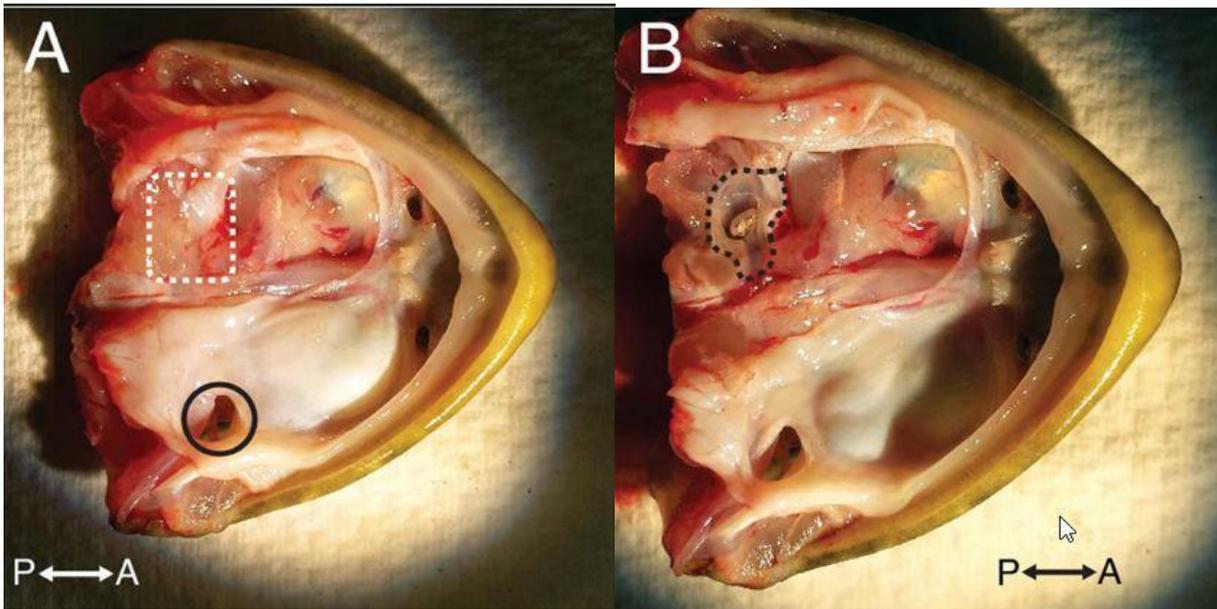


Figure 16: représentation schématique de l'oreille interne de grenouille en coupe frontale



A : La visualisation du palais supérieur du ouaouaron de son côté ventral permet d'identifier la trompe d'Eustache (cercle). L'écartement latéral de la peau recouvrant le côté droit du palais supérieur révèle l'emplacement de l'oreille interne (boîte en pointillés).

B : L'ablation du cartilage sur le côté ventral de l'os temporal de la grenouille ouvre la capsule otique (ligne pointillée).

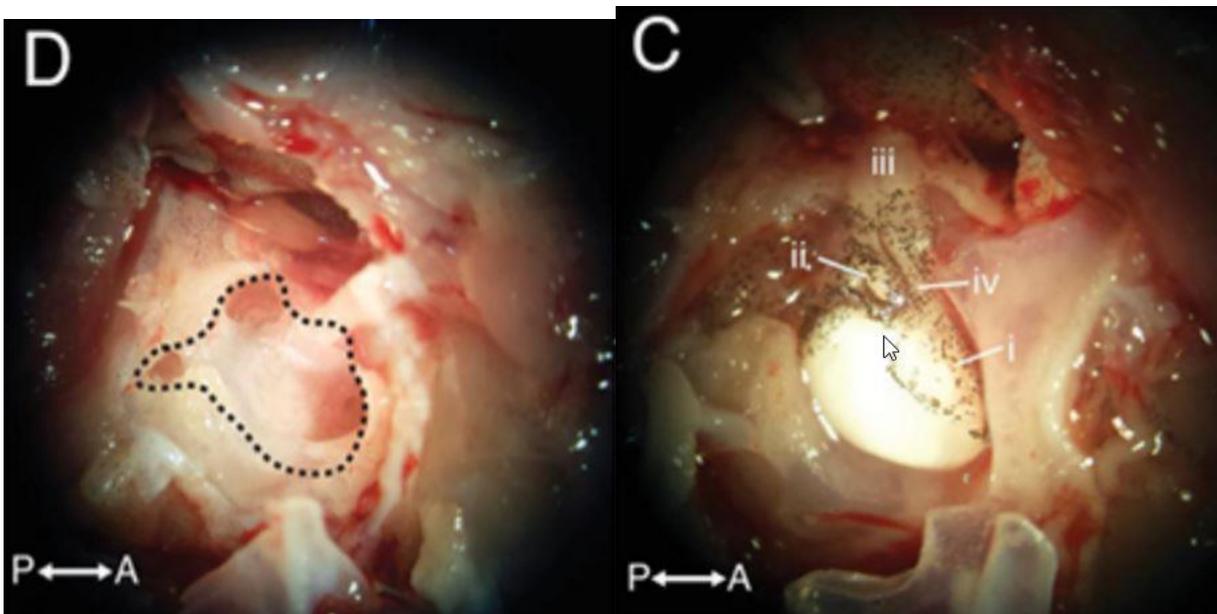


Figure 17: dissection de l'oreille interne de l'Ouaouaron (grenouille-taureau)

C : image à fort grossissement de la capsule otique, dans laquelle le sacculus, la lagena, le nerf crânien VIII et le nerf sacculaire peuvent être facilement identifiés.

D : Une vue de la capsule otique après l'ablation des organes de l'oreille interne révèle les emplacements des canaux semi-circulaires.

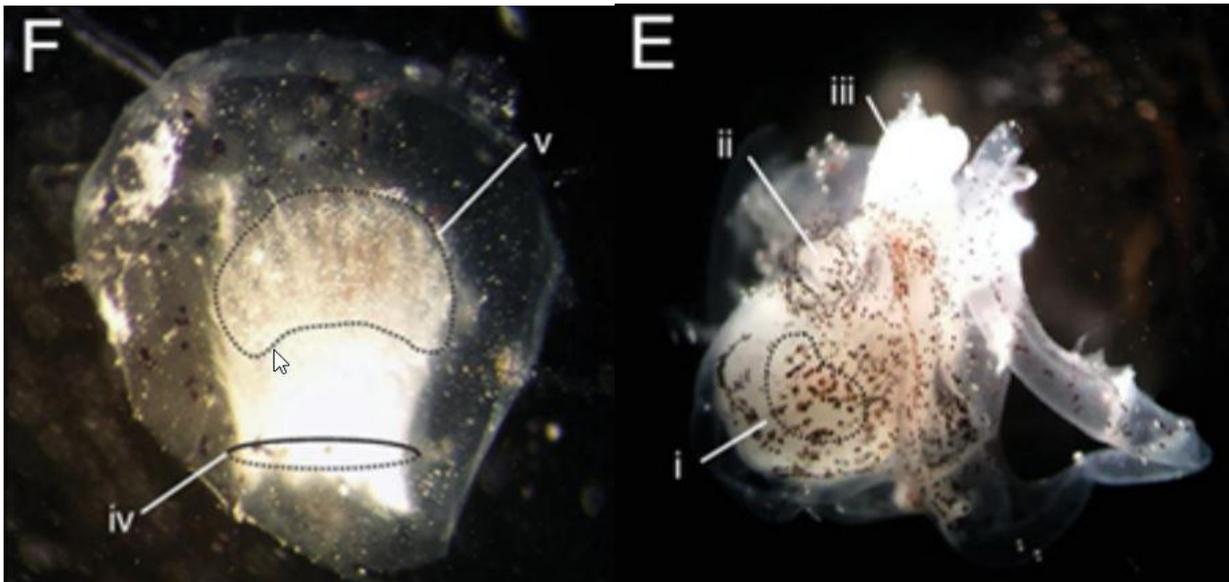


Figure 18: dissection de l'oreille interne de l'Ouaouaron (grenouille-taureau)

E : Après le retrait de l'oreille interne isolée, le sacculus, la lagène et le VIIIe nerf crânien (CN VIII) peuvent être facilement identifiés.

F : Le sacculus isolé possède un court moignon du nerf sacculaire et une membrane otolithique située au sommet de son épithélium sensoriel. Les étiquettes correspondent aux (i) sacculus, (ii) lagena, (iii) nerf crânien VIII, (iv) nerf sacculaire, et (v) membrane otolithique. Les étiquettes des axes P et A correspondent respectivement aux directions postérieure et antérieure. Les barres d'échelle représentent 1 cm (A, B), 1 mm (C, D, E) et 400 μ m (F)

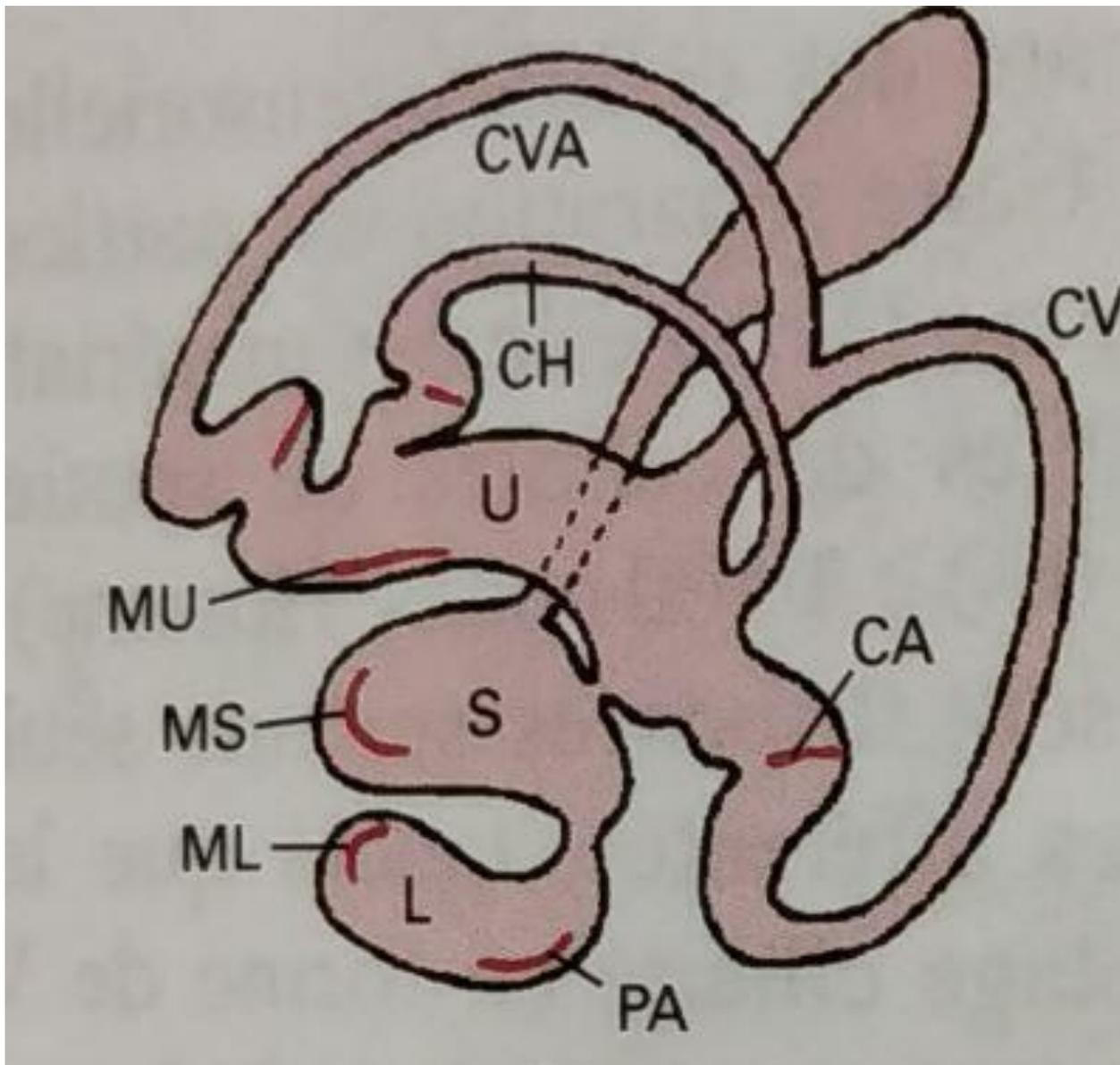


Figure 19: représentation schématique d'une oreille interne d'un reptile (lézard)

CVA/CVP : canal vertical antérieur, postérieur ; CH : canal horizontal ; U : utricule ; S : saccule ; CA : crête ampullaire ; MU, MS, ML : macule utriculaire, sacculaire, lagénaire ; PA : papille basilaire

4) Oiseaux et mammifères (16) (17) (18) (19)

La caractéristique fondamentale est l'allongement de la lagena et la disparition de la macule lagénaire. La lagena mérite alors le nom de canal cochléaire et la papille basilaire acoustique s'allonge en organe de Corti.

Chez les oiseaux, le canal cochléaire s'allonge et s'incurve mais ne s'enroule pas. L'enroulement en hélice de diamètre décroissant est caractéristique des mammifères. Cet enroulement du canal cochléaire est consécutif à celui du canal périlymphatique selon le mécanisme suivant. Au début, le canal périlymphatique forme une sorte de U dans la concavité duquel se place le canal cochléaire. La branche du U qui va de la fenêtre ovale au sommet de la courbe s'appellera la rampe vestibulaire, l'autre branche qui se termine à la fenêtre ronde s'appellera la rampe tympanique. Cette dernière s'applique sur le canal cochléaire au niveau de l'organe de Corti. L'ensemble des trois tubes s'enroule en hélice de diamètre décroissant et forme une sorte de coquille d'escargot.

L'organe de Corti, qui repose sur toute la longueur de la membrane basilaire contient les cellules ciliées qui sont les cellules réceptrices de son. Ces cellules (au nombre de 15 000 dans chaque cochlée humaine) sont agencées en quatre rangées parallèles sur toute la longueur de la membrane basilaire : une rangée de cellules ciliées internes et trois rangées de cellules ciliées externes. La surface chaque cellule est hérissée de 100 stéréocils. Leurs extrémités sont dans la membrane tectoriale, une projection en forme d'auvent qui surplombe l'organe de Corti sur toute sa longueur.

Chez les oiseaux, l'organe de Corti a des cellules étroites et hautes (plutôt que internes et externes) enchassées dans la membrane tectoriale, Le nombre de spires varie suivant les espèces, mais n'est pas en rapport avec la longueur déroulée de la cochlée. Ainsi chez l'être humain la cochlée mesure 35 mm de longueur et forme deux

tours trois quarts alors que chez le cobaye elle mesure 18 mm avec quatre tours. Chez les carnivores elle forme trois tours et demi, chez les cétacés et les chéiroptères un tour et demi, chez le cheval deux tours, chez la vache trois tours et demi, ou encore chez le porc quatre tours. Chez le *Coelogenus paca* (ou *cuniculus*) petit rongeur d'Amérique du Sud, elle dessine cinq tours.

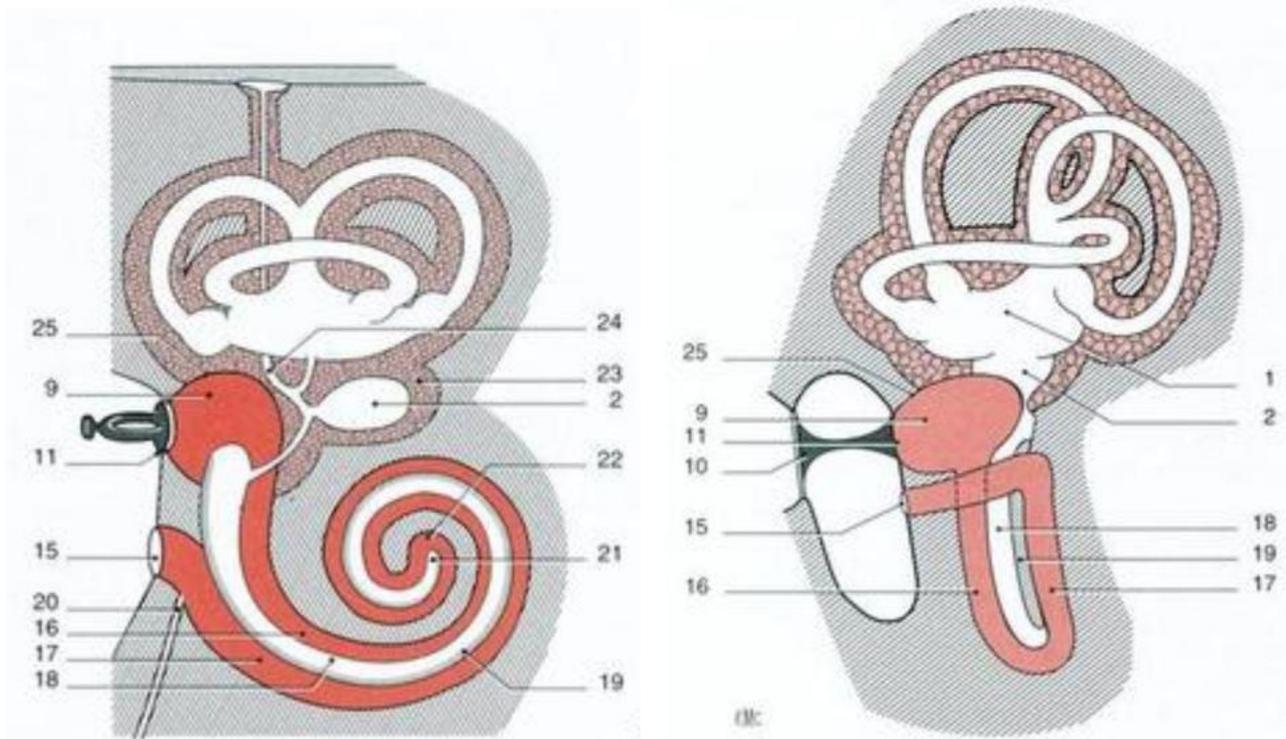


Figure 20: Evolution du labyrinthe membraneux et des espaces périlymphatiques (oiseaux et mammifères)

1. utricule ; 2. Saccule ; 3. Lagena ; 4. capsule otique ;
 5. labyrinthe membraneux ; 6. espace périlymphatique ; 7. Spiracle ; 8.
 Tympan ;
 9. citerne périlymphatique ; 10. Columelle ; 11. fenêtre ovale ;
 12. papille basilaire ; 13. canal périlymphatique ; 14. macule lagenaire ;
 15. fenêtre ronde ; 16. rampe vestibulaire ; 17. rampe tympanique ;
 18. canal cochléaire ; 19. organe de Corti ; 20. aqueduc de la cochlée ;
 21. caecum cupulaire ; 22. Helicotrema ; 23. tissu conjonctif ;
 24. canal endolymphatique ; 25. membrane limitante

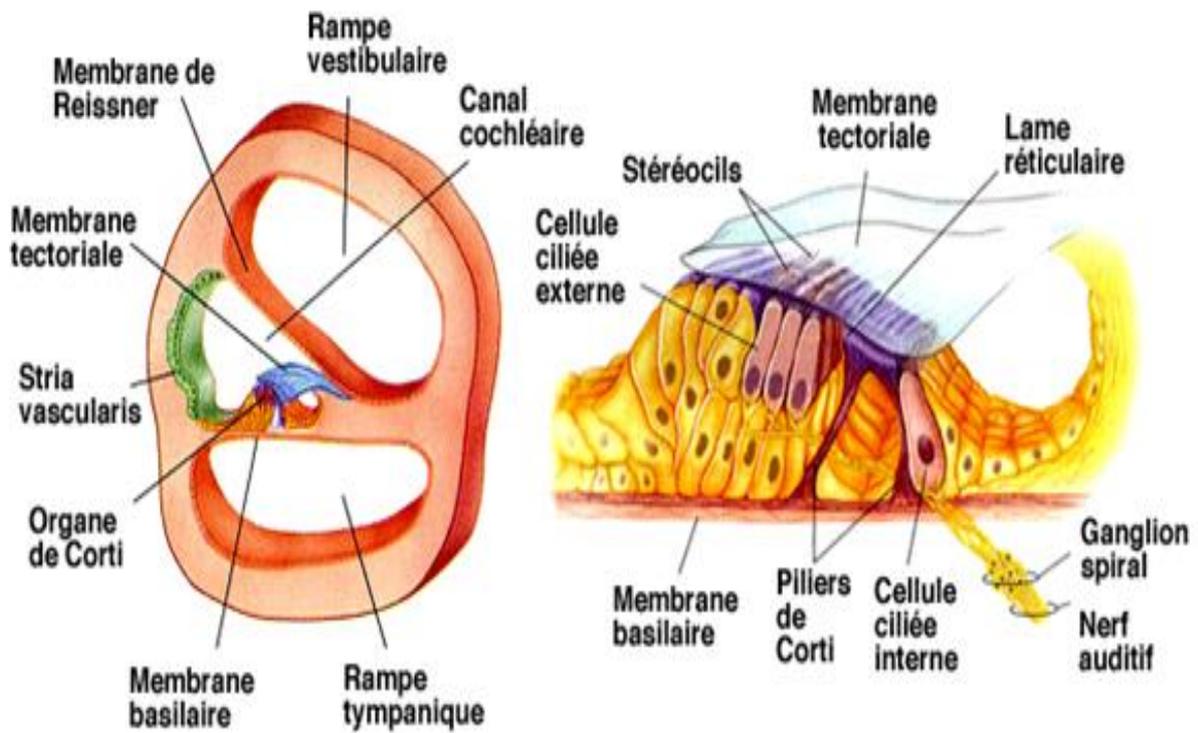


Figure 21: cochlée et organe de corti

C) Le nerf stato-acoustique (20) (1)

Il est constitué par les axones des neurones dont les dendrites naissent des récepteurs sensoriels des macules, crêtes et papilles. Ces axones font synapse dans les centres vestibulaires du bulbe et sont groupés en deux rameaux : le rameau antérieur provient de la macule utriculaire et des crêtes ampullaires des canaux latéral et antérieur ; le rameau postérieur provient de la crête du canal postérieur, des macules sacculaire et lagénaire et de la papille basilaire quand elle existe.

Chez les vertébrés supérieurs où la papille basilaire s'allonge en organe de Corti (oiseaux, mammifères) le rameau postérieur se partage en deux branches dont l'une s'isole en un nerf cochléaire purement auditif en rapport avec l'organe de Corti, tandis que l'autre s'unit au rameau antérieur en un nerf vestibulaire. Les corps des neurones sont groupés en deux ganglions : le ganglion cochléaire ou ganglion spiral de Corti et le ganglion vestibulaire ou de Scarpa.

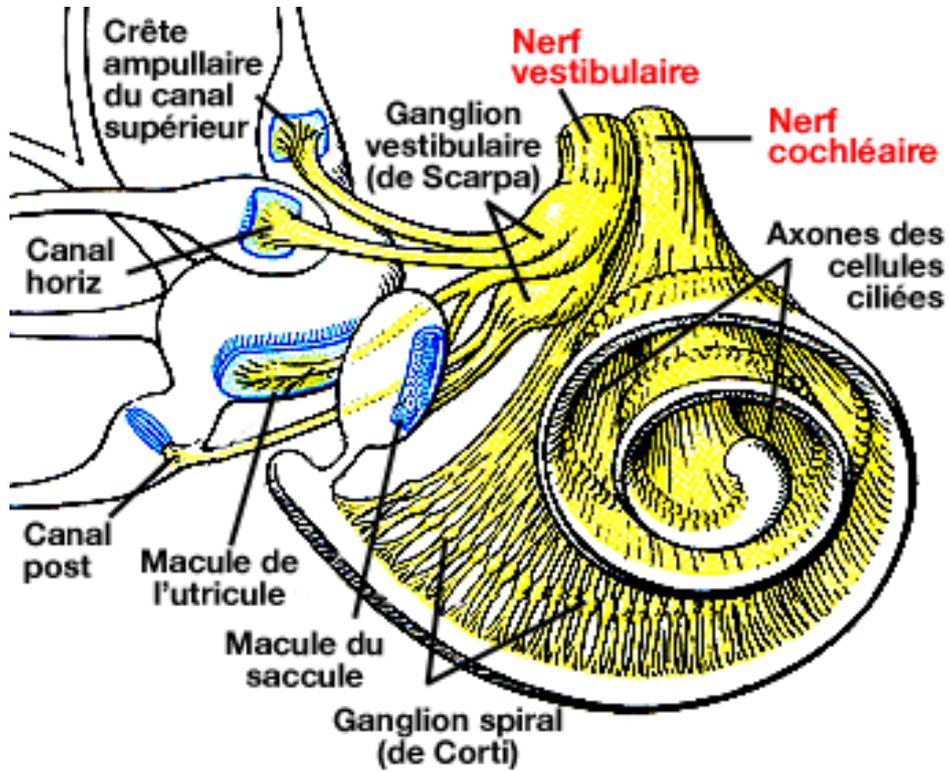


Figure 22 : nerf stato-acoustique

ANATOMIE COMPAREE DE L'ORGANE STATO ACOUSTIQUE

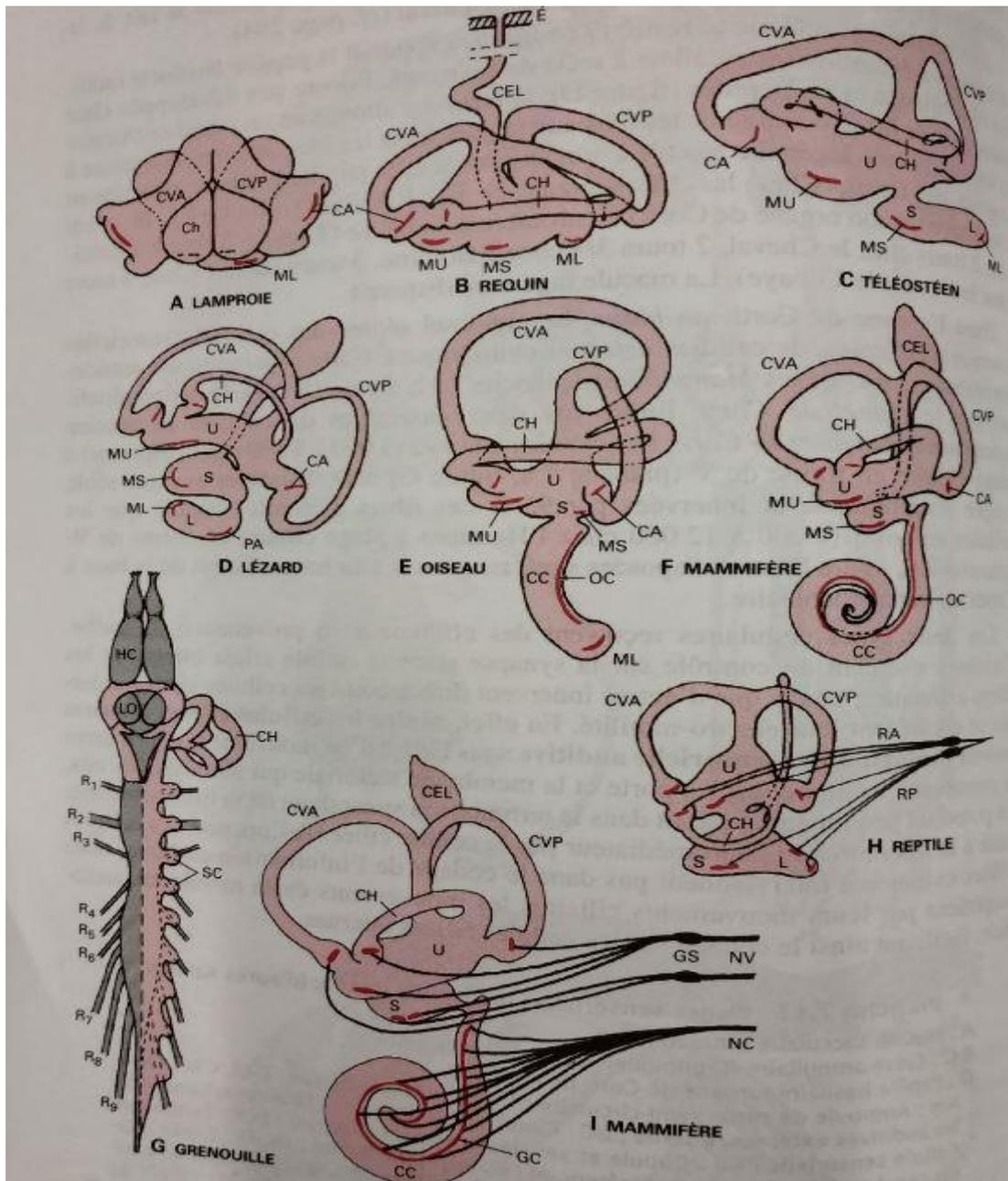


Figure 23: Evolution générale du labyrinthe membraneux (vues laterales gauches du labyrinthe gauche: A-F) et innervation des plages sensorielles (H-I). G : vue dorsale du névraxe et du système endolympatique d'une grenouille

CA: Crête ampullaire ; CC : canal cochléaire ; CEL : Canal endolympatique ; Ch: chambre ciliée ; CH, CVA, CVP : Canaux semi-circulaires horizontal, vertical antérieur ; E: Epiderme ; GC, GS : Ganglions de Corti, de Scarpa ; HC : hémisphères cérébraux ; L: Lagena ; LO: Lobes optiques ; ML, MS, MU: macule lagénaire , sacculaire, utriculaire ; NC, NV : Nerfs cochléaire, vestibulaire ; OC : organe de corti ; PA: Papille basilaire ; R: Nerfs rachidiens 1-9; RA ; RP: rameaux antérieur, postérieur du nerf acoustique, S: saccule ; SC : sac crayeux ; U : utricule

D) L'oreille moyenne (21) (22)

Dans l'eau, les vibrations sont transmises directement au labyrinthe membraneux par le squelette céphalique ou indirectement par l'intermédiaire de la vessie gazeuse.

Dans le milieu aérien, les vibrations sont trop faibles pour mobiliser directement l'endolymphe et chez les tétrapodes apparaît l'oreille moyenne, diverticule rempli d'air, développé à partir du pharynx et qui contient un appareil d'amplification et de transmission des vibrations aériennes. Cet appareil est constitué par la membrane du tympan associée à un osselet chez les reptiles et les oiseaux et à trois osselets chez les mammifères.

Ce système de transmission des vibrations du milieu extérieur à la fenêtre ovale et à la papille basilaire via la périlymphe, se complète chez les Mammifères, suite à la transformation de l'articulation de la mandibule, constituant une chaîne articulée de 3 osselets entre le tympan et la fenêtre ovale : l'étrier (ancienne columelle) appliqué sur la fenêtre ovale, l'enclume (ancien carré) et le marteau (ancien articulaire) appliqué sur le tympan.

Chez Les Vertébrés vivant en milieu aérien l'oreille moyenne assure un rôle amplificateur de pression et permet l'adaptation d'impédance entre le milieu externe aérien et le liquide de l'oreille interne. Sans ce système, on estime que la perte de puissance par réflexion sur l'interface air-eau serait d'environ -30 dB. C'est au niveau des structures constituées par l'oreille externe et l'oreille moyenne que se modèle la courbe de sensibilité auditive. Alors que les récepteurs de l'oreille interne ont un seuil de détection identique quelle que soit la fréquence sonore.

1) Reptiles et oiseaux (23) (24) (25) (26)

L'appareil tympano-ossiculaire des reptiles et des oiseaux comprend un tympan relié à la fenêtre ovale par un seul osselet ou columelle. Chez les reptiles le tympan peut être superficiel et situé au voisinage de l'articulation de la mâchoire inférieure, ou au fond d'une dépression qui ne correspond pas à un conduit auditif externe. Parfois, le tympan est rudimentaire ou peut même faire défaut ainsi que la cavité tympanique chez les serpents.

La caisse du tympan est une transformation de la première fente branchiale (fente spiraculaire des poissons). Celle-ci ne s'ouvre plus directement à l'extérieur mais conserve une large communication interne avec le pharynx sans rétrécissement tubulaire assimilable à une trompe d'Eustache. La columelle tympanique des reptiles dérive de l'os hyomandibulaire des poissons qui constitue le squelette du 2^e arc viscéral ou arc hyoïde. Cet os, dorsal, assure la liaison de la mâchoire supérieure avec la région otique du neurocrâne.

Chez les tétrapodes, l'os hyo-mandibulaire ne participe plus à la suspension des mâchoires et est incorporé dans l'oreille moyenne et devient la columelle tympanique. Déjà, entre le stade poisson et le stade reptile, c'est un os participant aux mâchoires qui est incorporé dans l'oreille moyenne. La columelle comprend deux parties, l'une interne (le stapes) toujours ossifié, l'autre externe cartilagineuse ou calcifiée, l'extracolumelle.

Le stapes est allongé en forme de baguette dont l'extrémité interne élargie en plaque est fixée sur la fenêtre ovale. L'extrémité externe est reliée au tympan.



Figure 24: localisation de la membrane tympanique chez les reptiles

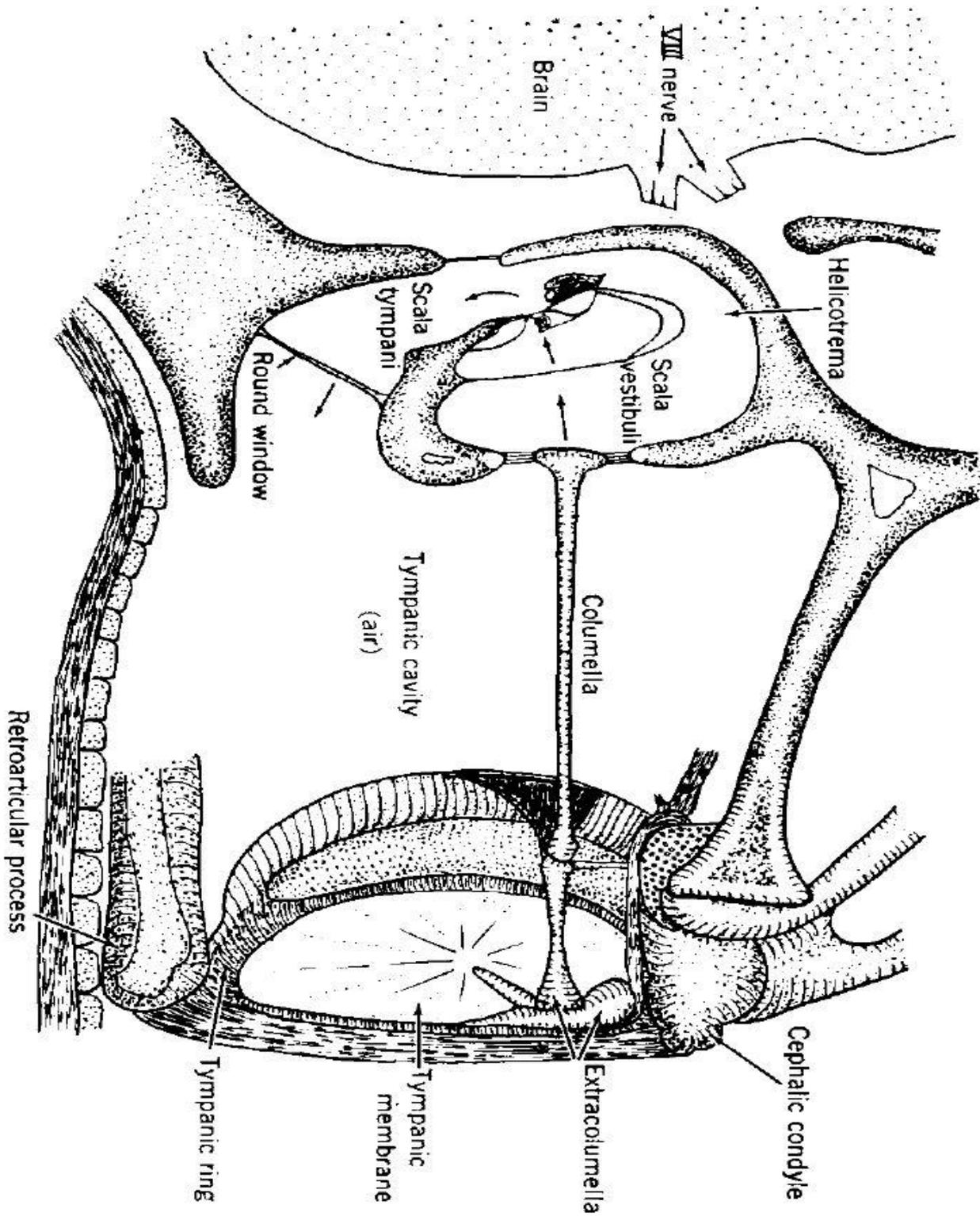


Figure 25: oreille moyenne des reptiles

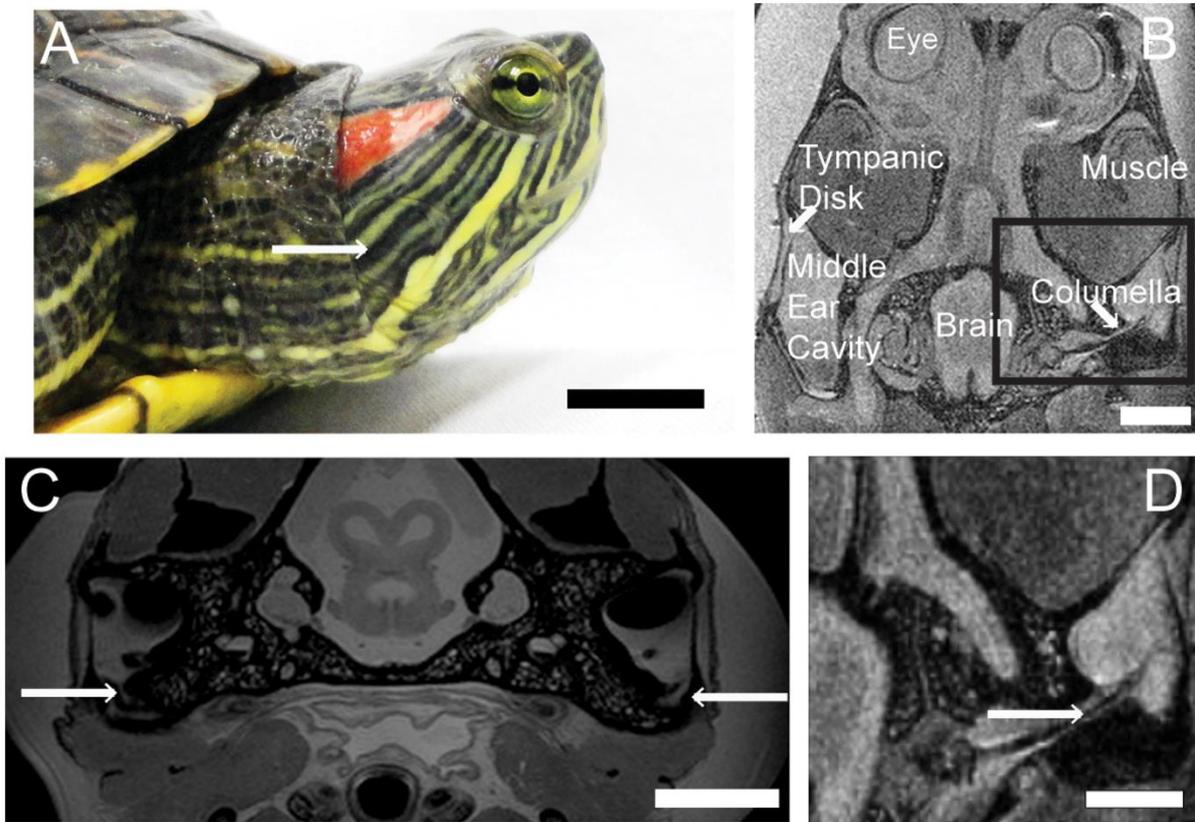


Figure 26: oreille moyenne des reptiles (IRM centrée sur l'oreille moyenne d'une tortue)

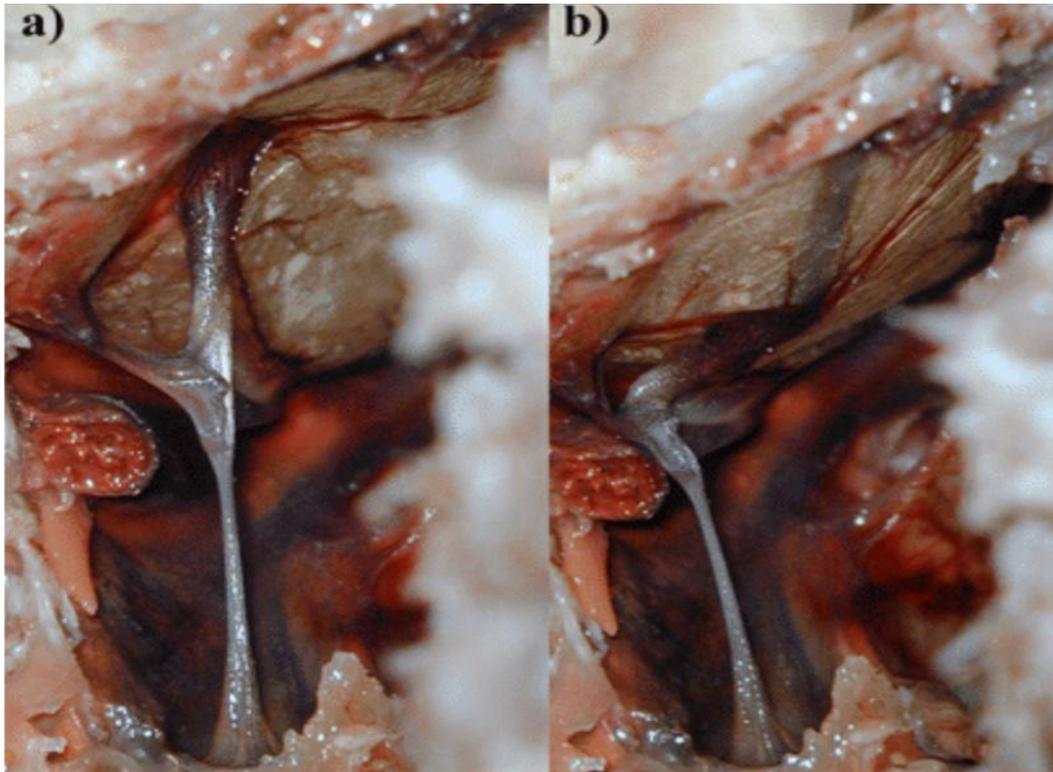


Figure 27: Oreillemoyenne d'une autruche après dissection montrant la membrane tympanique et la collumelle

a) Particularité de l'oreille moyenne des oiseaux : couplage inter-aural (27)

Tous les oiseaux ont des canaux inter-auraux complexes reliant leurs oreilles moyennes, l'effet du couplage interaural sur l'audition directionnelle a été discuté. La base anatomique de ce couplage est le «canal interaural», qui se révèle être un système de canaux et de cavités très complexe. Ainsi, l'augmentation de la pression de l'air à l'extérieur d'une oreille fait gonfler le tympan de l'oreille controlatérale.

Les oiseaux peuvent exploiter la différence de pression où le son peut agir des deux côtés de leur tympan à travers leurs oreilles couplées en interne pour la localisation du son.

b) Particularité de l'oreille moyenne des oiseaux: l'organe paratympanique

L'organe paratympanique est un petit organe sensoriel situé dans les oreilles moyennes des oiseaux, très près du tympan et l'os quadratum.

Il contient environ 2500 cellules ciliées de type II (même type que les cellules ciliées externes de l'organe de Corti). Il a été suggéré que l'organe paratympanique détecte les changements de pression atmosphérique, fonctionnant ainsi comme altimètre chez les oiseaux migrateurs. Il a également été suggéré comme détecteur d'infrasons pouvant guider les oiseaux migrateurs. Il a été aussi suggéré que l'organe paratympanique pouvait également fonctionner comme un relais sensoriel avec le muscle de l'oreille moyenne pour contrôler la tension du tympan.

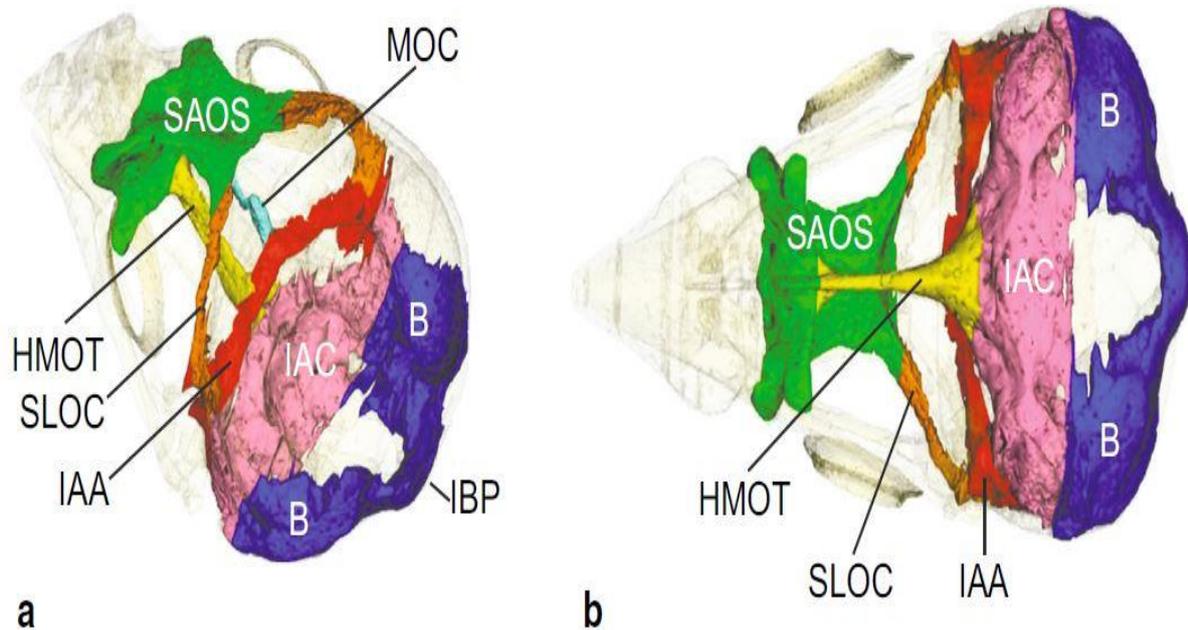


Figure 28: reconstruction 3D à partir d'une micro-TDM montrant le canal reliant les deux oreilles moyenne chez les oiseaux

a : vue postéro supérieur, b : vue inférieur après ablation du bec

SLOC : canal orbitaire supéro-latéral ; SAOS : sinus orbitaire supéro-antérieur ;
 IAA : arc inter-aural ; IAC : canal inter-aural ; HMOT : canal orbitaire inféro-médial ; MOC : canal médio-orbitaire

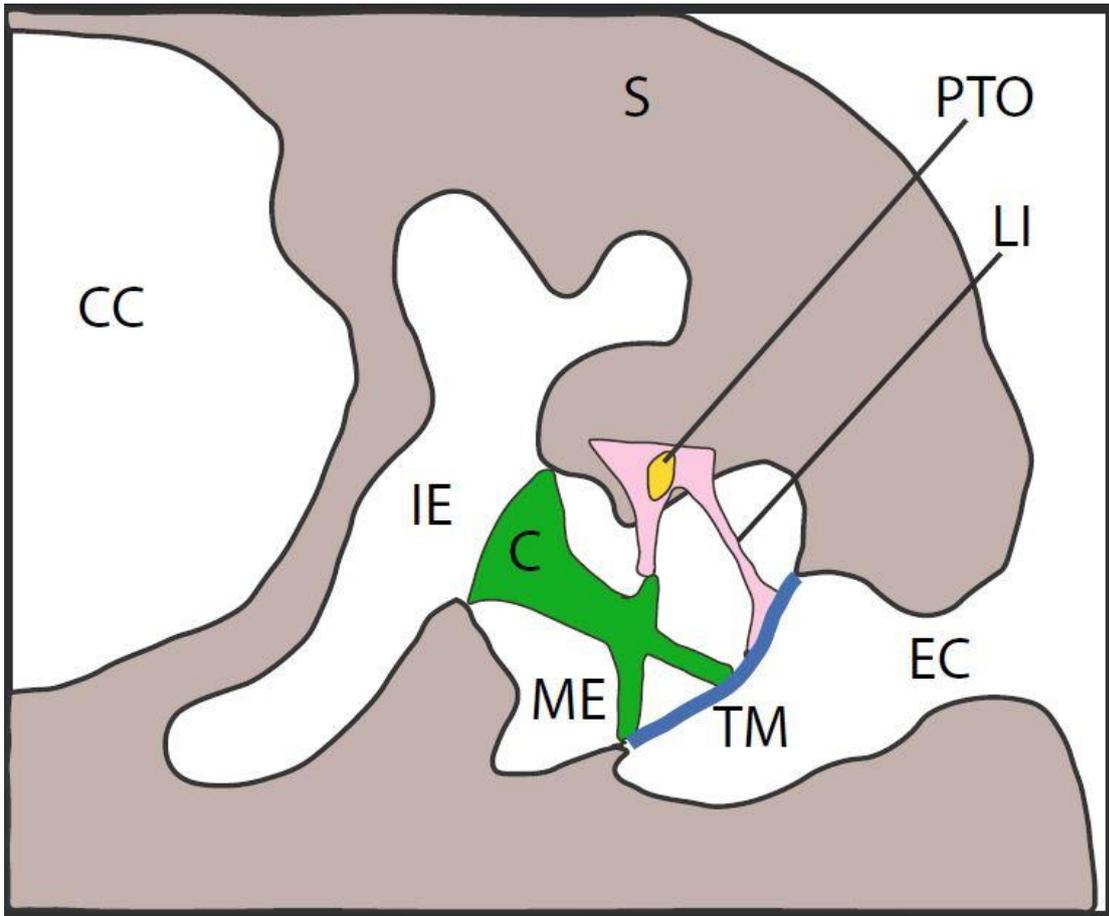


Figure 29: schéma montrant la localisation de l'organe paratympanique

S : crâne ; cc : cavité crânienne ; IE : oreille interne ; PTO : organe paratympanique ;
LI : ligament ; TM : membrane tympanique ; ME : oreille moyenne ;

2) Les mammifères (26)

Chez les mammifères, l'oreille moyenne est formée d'un tympan relié à la fenêtre ovale par une chaîne ossiculaire formée par trois petits osselets : l'étrier (ancienne columelle) appliqué sur la fenêtre ovale, l'enclume (ancien carré) et le marteau (ancien articulaire) appliqué sur le tympan. Le tout est contenu dans une petite cavité (la caisse du tympan) et communique avec le pharynx par une trompe auditive.

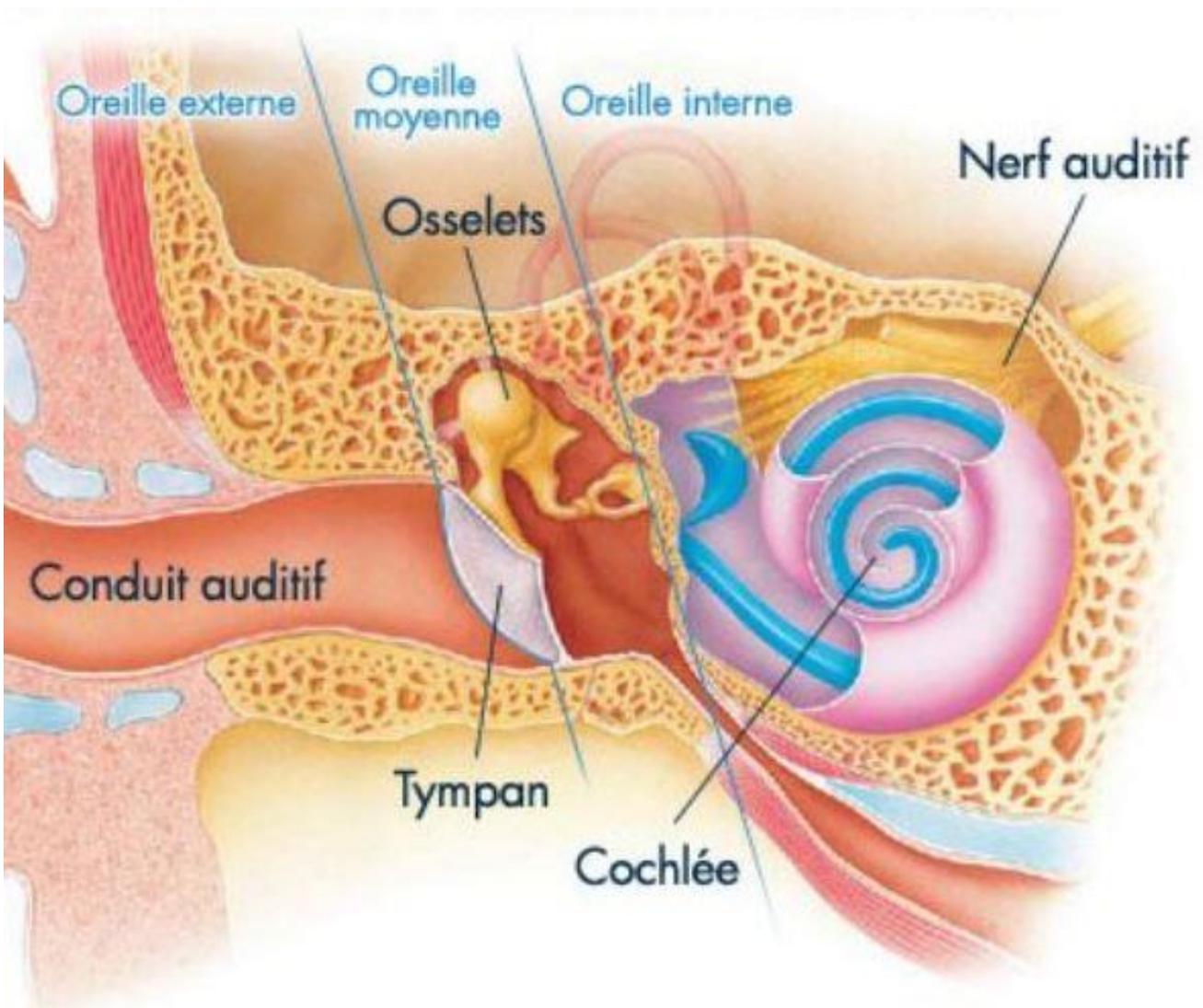


Figure 30: représentation schématique de l'oreille

3) Transformation de la chaîne ossiculaire entre les reptiles et les mammifères

(1) (28)

Chez tous les vertébrés pourvus de mâchoires (gnathostomes) sauf les mammifères, la mâchoire inférieure est constituée par plusieurs os dont l'un appelé articulaire s'articule avec un os du crâne, le carré (quadratum) : c'est l'articulation quadratoarticulaire. Cette articulation constitue la partie postérieure ossifiée du cartilage de Meckel

Chez les mammifères, la mâchoire inférieure n'est formée que par un seul os ; le dentaire, équivalent de celui des reptiles. Il s'articule avec un os du crâne : le squamosal ou partie écailleuse du temporal, formant l'articulation squamosodentaire.

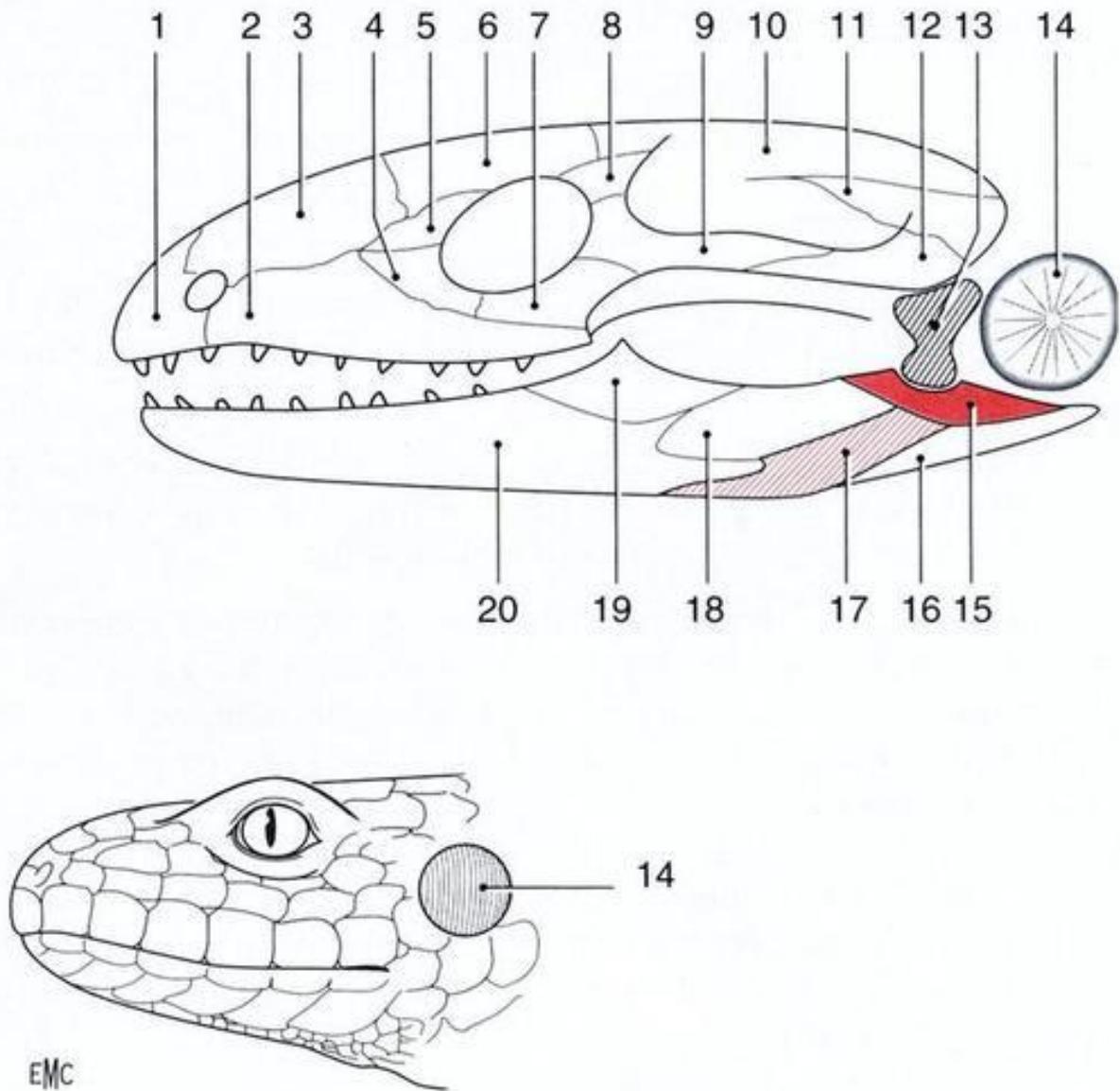


Figure 31: Articulation cranio-mandibulaire chez les reptiles (squelette de la tête d'un lézard).

1. prémaxillaire 2. Maxillaire 3. Nasal 4. Lacrymal 5. Préfrontal 6. Frontal 7. Jugal
 8. postfrontal 9. Postorbitaire 10. Pariétal 11. Supratemporal 12. Squamosal 13.
 Carré 14. tympan 15. Articulaires 16. Articulaires dermiques 17. Angulaire 18. Supra-
 angulaire 19. coronoïde 20. Dentaire

Selon la théorie de Reichert (1838) et Gaupp (1913) les deux os reptiliens, carré et articulaire avec leur articulation sont devenus respectivement l'enclume (incus) et le marteau (malleus) de l'oreille moyenne des mammifères.

Cette homologie (identité de forme et de position et non de fonction) a été établie par ces deux auteurs à partir des formes embryonnaires et non adultes.

Cette théorie s'est vue confirmée par la paléontologie grâce à la découverte des formes intermédiaires permettant d'expliquer le passage du stade reptilien de l'articulation au stade mammalien. Certains fossiles de reptiles présentent en effet une mâchoire inférieure qui s'articule de chaque côté avec le crâne par deux articulations; l'une est quadratoarticulaire, l'autre squamosodentaire.

Le dentaire s'étant développé vers l'arrière, entre en contact avec le squamosal juste à côté du carré. Les deux articulations sont l'une à côté de l'autre et l'articulaire et le carré sont réduits de taille.

Ainsi l'articulation entre le crâne et la mâchoire inférieure des reptiles se retrouve, chez les mammifères, entre le marteau et l'enclume dans la caisse du tympan. L'angulaire de la mâchoire reptilienne devient l'os tympanal des mammifères.

En conclusion il est curieux de constater qu'un os de la mâchoire des poissons devient l'osselet de l'oreille moyenne des reptiles et que deux os de la mâchoire des reptiles deviennent des osselets de l'oreille moyenne des mammifères.

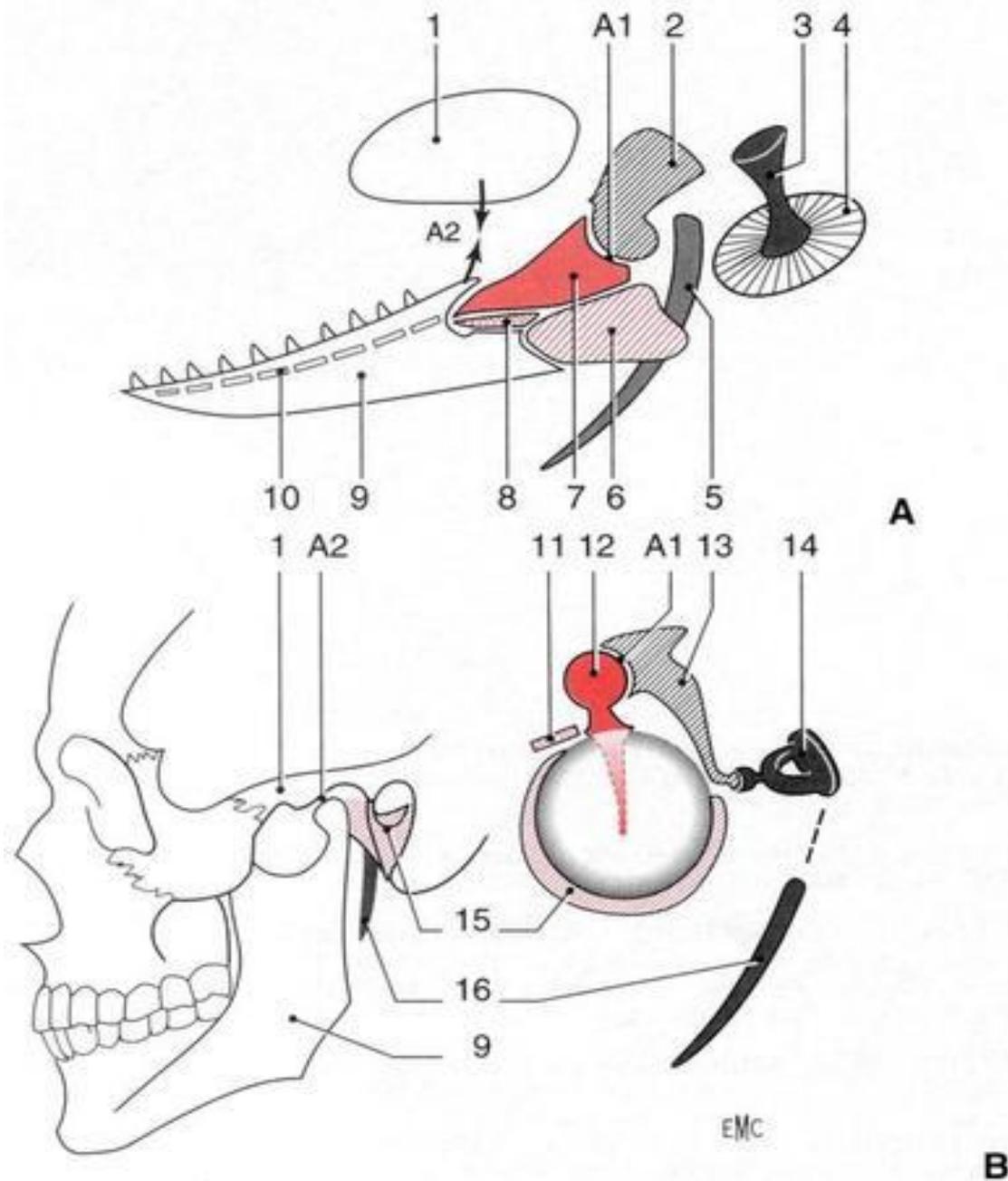


Figure 32: Evolution de l'articulation de la mâchoire inférieure entre les reptiles A (articulation A 1) et les mammifères B (articulation A 2).

1. os squamosal 2. os carré (crâne) 3. os columelle tympanique 4. Tympan 5. cartilage de Reichert 6. os angulaire 7. os articulaire 8. os gonial 9. os dentaire 10. cartilage de Meckel 11.apophyse antérieure de l'os marteau 12. marteau (malleus) 13. enclume (incus) 14. étrier (stapes) 15. os tympanal 16. apophyse styloïde

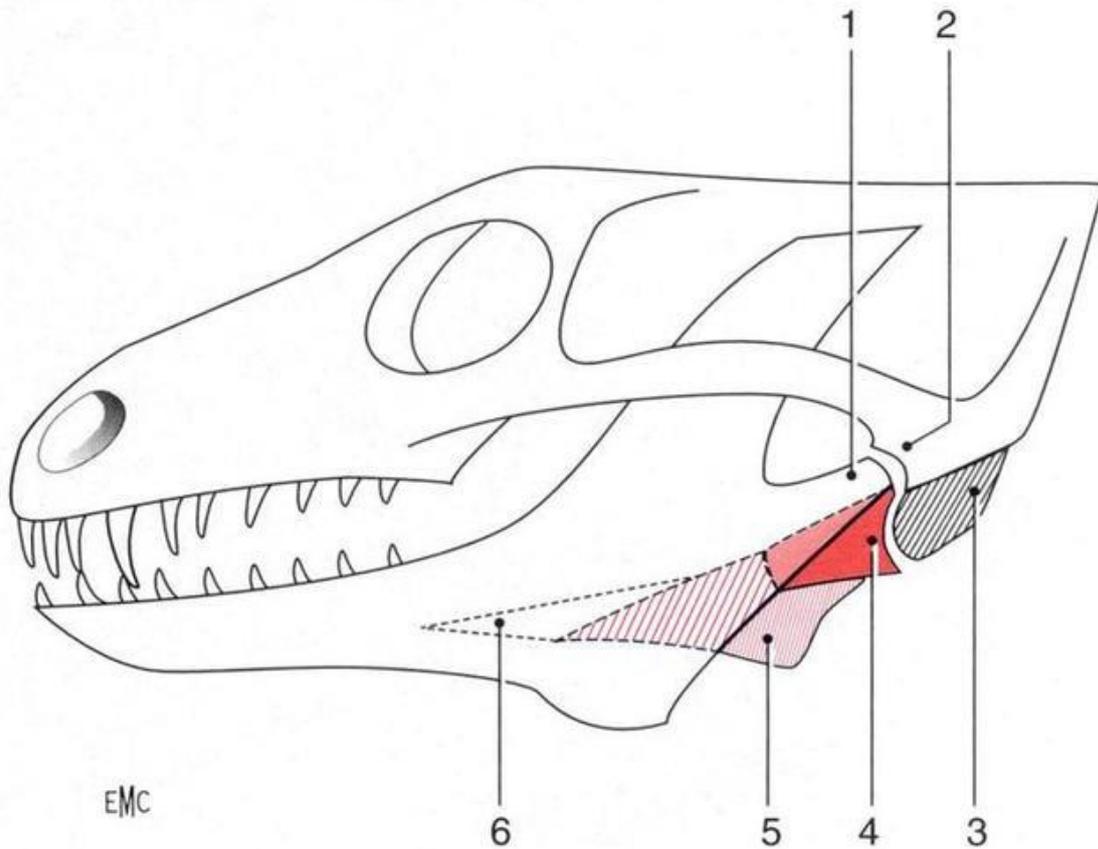


Figure 33 : Diarthrognathus (reptile existant il y a 200 millions d'années) fait la transition entre reptiles et mammifères (puisque'il présente simultanément les deux articulations squamoso-dentaire et quadratoarticulaire)

1.os dentaire 2. os squamosal 3. os carré 4. os articulaire 5. os angulaire 6. os surangulaire

4)Appareil original (1)

Il faut citer un appareil original qui n'existe que chez le têtard d'anoues (grenouille, crapaud).

Il existe un osselet ou columelle qui relie le tympan au labyrinthe membraneux. La particularité est que ce tympan se trouve dans la paroi de la bronche et recueille les vibrations de l'air inhalé. La bronche joue le rôle de conduit auditif externe. Cette columelle traverse la crosse de l'aorte et s'applique contre la fenêtre ronde (et non pas ovale). Il est probable qu'elle recueille les vibrations du sang. La fenêtre ovale est fermée par un operculum relié à une columelle tympanique.

L'oreille moyenne des amphibiens varie beaucoup. La cavité tympanique et le tympan ont régressé ou sont absents chez les amphibiens apodes, urodèles et une partie des anoues (à l'exception des grenouilles et des crapauds). La columelle persiste cependant mais relie la fenêtre ovale à l'os carré du crâne. Chez tous les amphibiens (pourvus ou non d'une cavité tympanique) la fenêtre ovale est occupée par un second osselet ; l'operculum qui n'a aucun homologue chez les autres vertébrés.

Détaché de la paroi de la capsule otique, il est situé en arrière de la columelle et connecté à la ceinture pectorale par un muscle operculaire dérivé de l'élévateur de la scapula. Il est probable que ce système recueille les vibrations du sol.

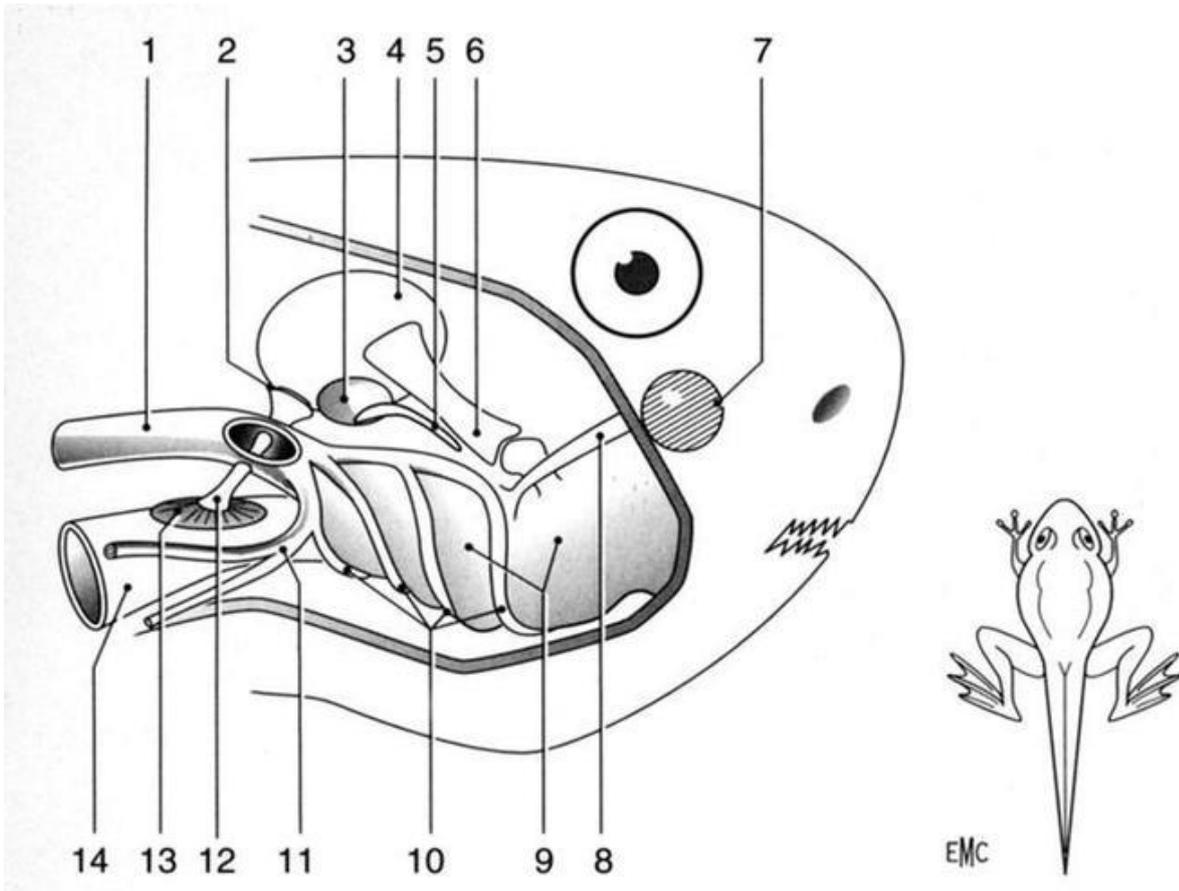


Figure 34: Appareil auditif chez le têtard de la grenouille. La transmission des vibrations de l'air inhalé se fait par une columelle bronchique traversant l'aorte.

1. aorte dorsale
2. fenêtre ronde
3. operculum fermant la fenêtré ovale
4. capsule otique
5. columelle tympanique
6. os carré
7. ébauche du tympan
8. canal tubaire
9. vestibule branchial du pharynx
10. arcs aortiques
11. artère pulmonaire
12. columelle bronchique
13. membrane bronchique
14. Bronche

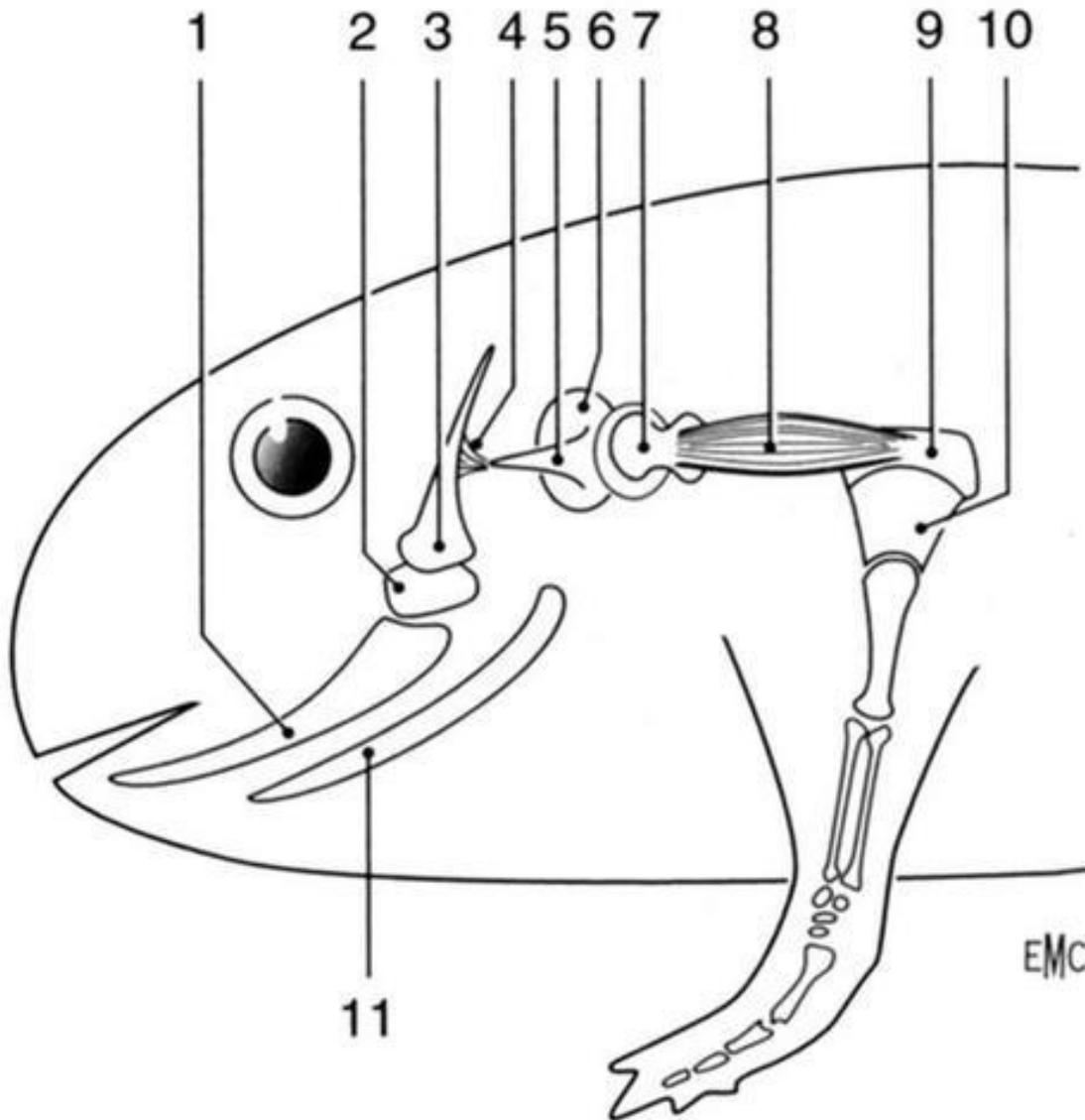


Figure 35: Chez les urodèles (triton) les vibrations du sol sont transmises à l'oreille interne par un muscle (operculaire) reliant la supra scapula à l'operculum qui ferme la fenêtre ovale.

1. cartilage de Meckel 2. os palatocarré 3. os squamosal 4. ligament squamosocolumellaire
 5. stylus de la columelle 6. base de la columelle 7. Operculum
 8. muscle operculaire 9. suprascapula 10. Scapula 11. Ceratohyal

E) L'oreille externe

Souvent superficiel chez les reptiles, le tympan s'enfonce dans le crâne chez les oiseaux et les mammifères. Ainsi se forme, le conduit auditif externe développé à partir de la première fente ectodermique. La muqueuse de la caisse du tympan s'affronte au revêtement cutané emprisonnant une couche intermédiaire de tissu fibreux.

Chez les mammifères, d'autre part, des appendices cutanés à charpente cartilagineuse, de dimensions et de forme variables vont constituer le pavillon de l'oreille. Des muscles peauciers commandés par le nerf facial donnent à ce pavillon une mobilité plus ou moins importante, ce qui permet d'améliorer la localisation et le recueil des sons. Chez l'éléphant, le conduit auditif externe mesure 20 cm de longueur, le tympan 3×2 cm, la platine de l'étrier mesure $5,3 \times 3,8$ mm, enfin la cochlée a 60 mm de longueur.

Chez les cétacés (mammifères aquatiques), l'audition est la fonction sensorielle la plus développée. En raison de la vie aquatique le conduit auditif externe a 1 mm de diamètre et est plus ou moins obstrué par un bouchon épithélial.

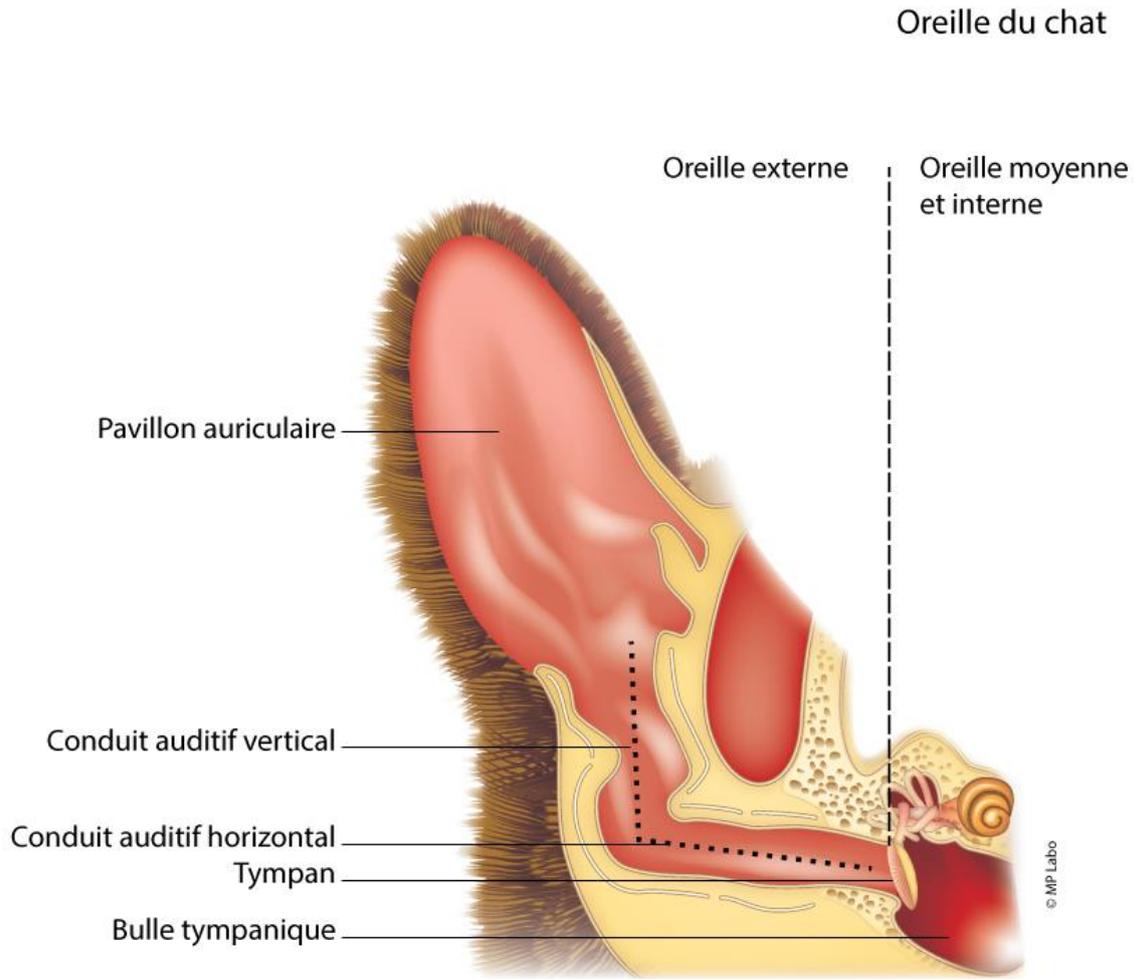


Figure 36: représentation schématique de l'oreille externe des mammifères (chat)

F) Organe de l'équilibre des invertébrés (21) (29) (30)

De nombreux groupes d'animaux possèdent des récepteurs sensible à la gravité, appelés statocystes, qui sont considérés comme les organes de l'équilibre les plus simples. Cet organe sensoriel est particulièrement important pour les animaux qui flottent, car ils n'ont pas d'autres sources leur procurant des informations sur la gravité.

Un statocyste se présente comme une chambre remplie de liquide, limitée par un épithélium sensoriel cilié et renfermant un granule solide appelé statolithe. Tout mouvement de l'animal déplace le statolithe et le liquide, modifiant alors le pattern de l'information qui émerge de l'épithélium sensoriel. Quand un animal est en mouvement, le déplacement du statolithe et du liquide au-dessus de l'épithélium sensoriel retentit sur la position des cils et la transduction mécano sensorielle consécutive fournit une information sur l'accélération linéaire et rotatoire de l'animal par rapport à l'environnement.

On trouve une grande variété de détecteurs de mouvement (appelés statorécepteurs) chez les Invertébrés et seuls les exemples les plus pertinents seront retenus dans ce qui suit.

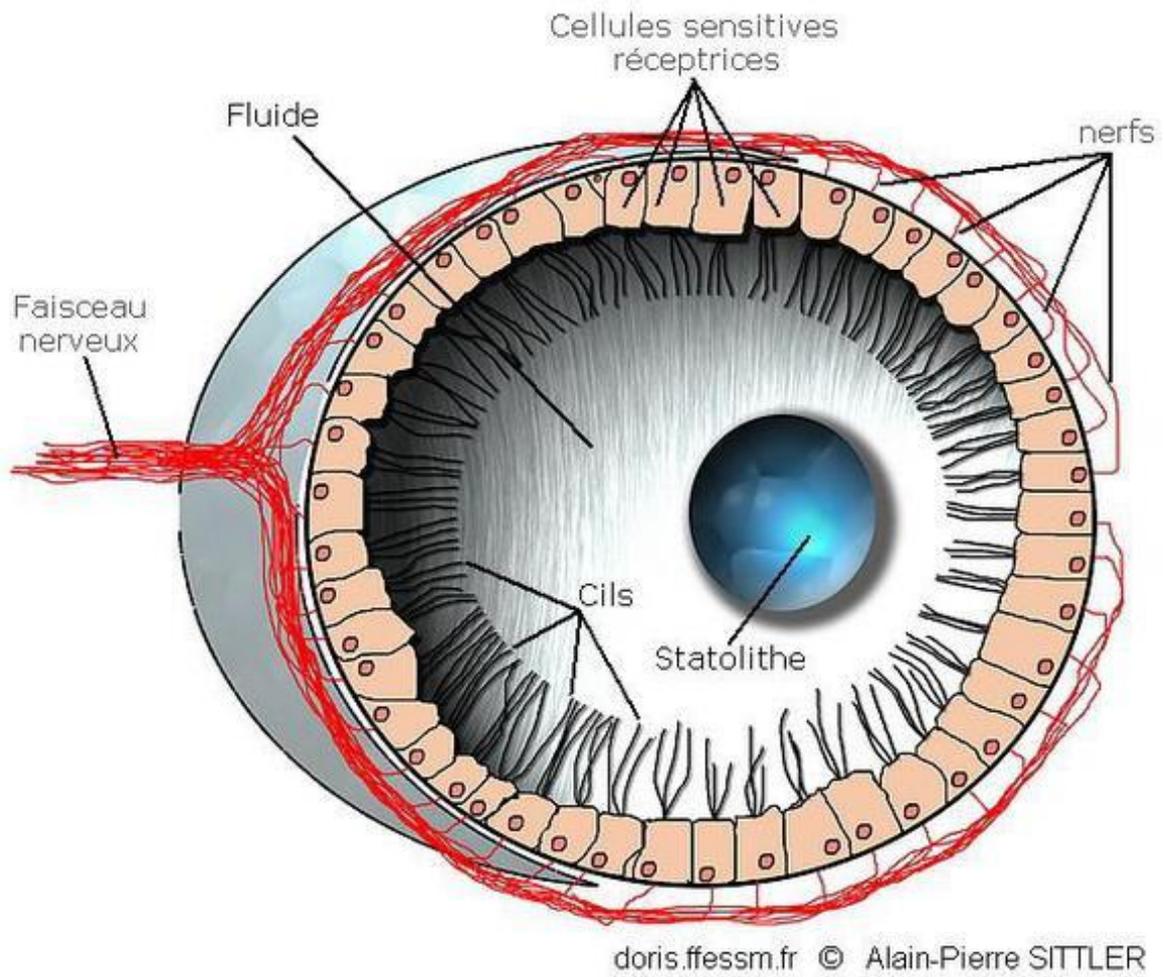


Figure 37: gérorécepteur d'un invertébré (statocyste vue en coupe).

1) Calamar et seiches (31)

Les statocystes des calmars et des seiches sont composés de sortes de gorges ou pseudo-tores (toroids), qui dirigent le flux d'endolymphe vers une zone sensorielle où se trouve une cupule, et sont donc ainsi très similaires aux canaux semi-circulaires des vertébrés. Les « canaux » des statocystes sont disposés selon une organisation tridimensionnelle comprenant trois plans quasi orthogonaux. Mais, contrairement à l'organisation observée chez les vertébrés, il y a quatre canaux de chaque côté, et ceux-ci sont orientés dans les plans principaux du corps. Les capteurs sensoriels du plan transversal (frontal) sont excités lors d'un mouvement de roulis ipsilatéral vers le haut, ceux du plan longitudinal (sagittal) par des rotations de tangage vers le haut ou le bas, et les capteurs du plan horizontal détectent les rotations horizontales controlatérales. D'autres récepteurs sont sensibles également aux accélérations linéaires. Ainsi, le système canalaire du calamar est capable de détecter les accélérations angulaires tridimensionnelles, tout comme les canaux semi-circulaires des vertébrés, et il possède aussi les propriétés de symétrie bilatérale, d'orthogonalité mutuelle et de fonctionnement push-pull.

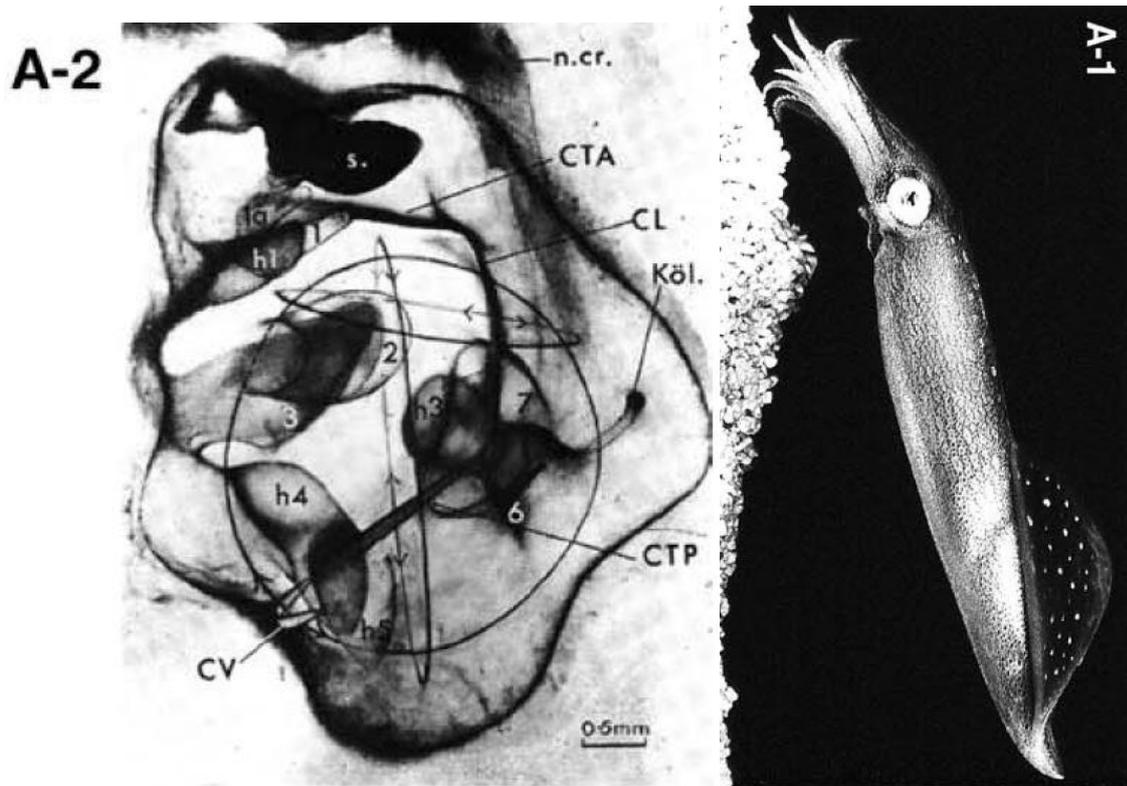


Figure 38: système de détection de mouvement du calamar

A-1 : Photographie de l'animal

A-2 : Photographie retouchée d'un statocyste (organe de l'équilibre) ; vue de dessus indiquant l'orientation des pseudo-tores (équivalents des canaux semi-circulaires)

2) La pieuvre

Chez la pieuvre, le capteur sensoriel bilatéral est divisé en neuf sous-sections regroupées dans trois plans principaux approximativement orthogonaux. L'organisation spatiale des sous-sections rappelle le système de détection de l'accélération angulaire des vertébrés et, parallèlement, que l'organisation des muscles extraoculaires des pieuvres ressemble fort à celle des vertébrés possédant des yeux latéraux.

3) Le crabe

Le troisième exemple de « système canalaire » des invertébrés est celui du crabe. Il est composé d'une structure bilatérale qui comprend une sorte de tore horizontal et un autre vertical. En fonction des espèces, ces tores peuvent être ouverts, ou bien fermés. Chez un crabe libre de ses mouvements, les canaux horizontaux sont orientés parallèlement à l'horizontale terrestre, et puisque les canaux verticaux leur sont presque perpendiculaires, ils sont proches de la verticale. Chaque canal vertical est orienté à 45° du plan médio-sagittal, à l'instar des canaux antérieurs des vertébrés. Bien qu'il n'y ait qu'un seul canal vertical de chaque côté, les deux canaux verticaux répondent préférentiellement à des mouvements selon des axes quasi orthogonaux et, par conséquent, les quatre canaux du crabe peuvent percevoir collectivement les accélérations angulaires dans les trois dimensions de l'espace.

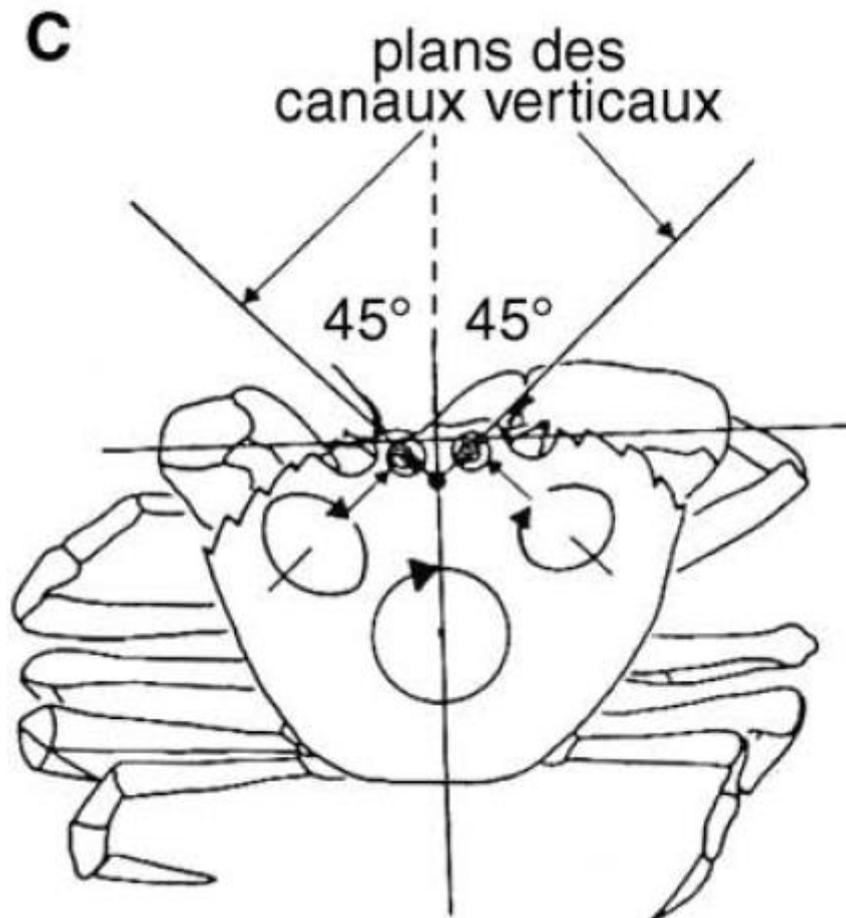


Figure 39: Crabe. Organisation spatiale

G) Système de la ligne latérale (4) (29) (22)

Il nous semble judicieux de parler d'un système indépendant parallèle qui intervient chez les poissons et certains amphibiens dans la détection du son, du mouvement, et des obstacles.

Chez les poissons, un système somesthésique spécialisé s'étend tout le long du corps. L'information sur l'orientation de l'animal par rapport à la gravité sa vitesse de nage et des détails sur les courants d'eau et les vibrations est collectée par un cordon de cellules sensorielles ou neuromastes, unités de base du système de la ligne latérale.

Ce système sensoriel superficiel n'est présent que chez les seuls Anamniotes aquatiques : Lamproies, Poissons, Amphibiens. Il est absent, ou réduit à de rares éléments chez les Myxines. Chez les Amphibiens, son existence et son développement sont liés à leur dépendance au milieu aquatique. Il est présent chez les larves mais disparaît à la métamorphose, sauf chez les formes qui restent aquatiques : Xénope, Pipa... , chez les Anoures, Axolotl, Pleurodèle... , chez les Urodèles, Typhlonectides chez les Apodes.

Le Triton terrestre *Notophtalmus viridescens* de l'Est des États-Unis constitue une exception remarquable en conservant son système latéral après la métamorphose ; mais il est partiellement différencié et recouvert par des cellules épidermiques. La redifférenciation a lieu chaque année, peu avant le retour à l'eau pour la reproduction.

Le système latéral est absent chez les Amniotes, même chez les formes secondairement aquatiques (Cétacés, Siréniens).

La ligne latérale a disparu lors du passage à la vie terrestre, à l'exception de sa forme dérivée, l'oreille interne. Cette dernière a d'ailleurs gardé de nombreux points communs avec la ligne latérale, dont la projection rhombencéphalique des neurones auditifs, et le fait que les processus ciliés des cellules sensorielles baignent dans un milieu liquide.

Le système latéral est sensible aux : déplacements de l'eau du milieu extérieur animal (qui permettent la coordination et la synchronisation des mouvements individuels dans un banc de poissons), aux ondes de surface engendrée par les mouvements d'une proie à la surface de l'eau (qui permettent de déterminer sa distance), aux ondes basse fréquences (quelques Hz à 200 Hz) de source proche (qui le feraient intervenir dans l'audition), éventuellement au champ magnétique terrestre et à ses variations (ce qui le ferait participer à la navigation des poissons migrateurs en haute mer).

Un poisson qui nage génère des ondes dans l'eau qui sont détectées par le système latéral d'autres poissons. Il crée également une vague d'étrave devant lui dont la pression est supérieure à celle qui s'écoule le long de ses côtés. Ces légères différences de pression sont détectées par son propre système latéral. Lorsque le poisson s'approche d'un objet solide comme un rocher ou la paroi de verre d'un aquarium, les vagues de pression autour de son corps sont déformées suffisamment pour que le système latéral enregistre ces modifications et que le poisson s'écarte de ces obstacles. Le poisson qui s'éduque coordonne également ses mouvements en détectant les changements de pression et de courant.

ANATOMIE COMPAREE DE L'ORGANE STATO ACOUSTIQUE

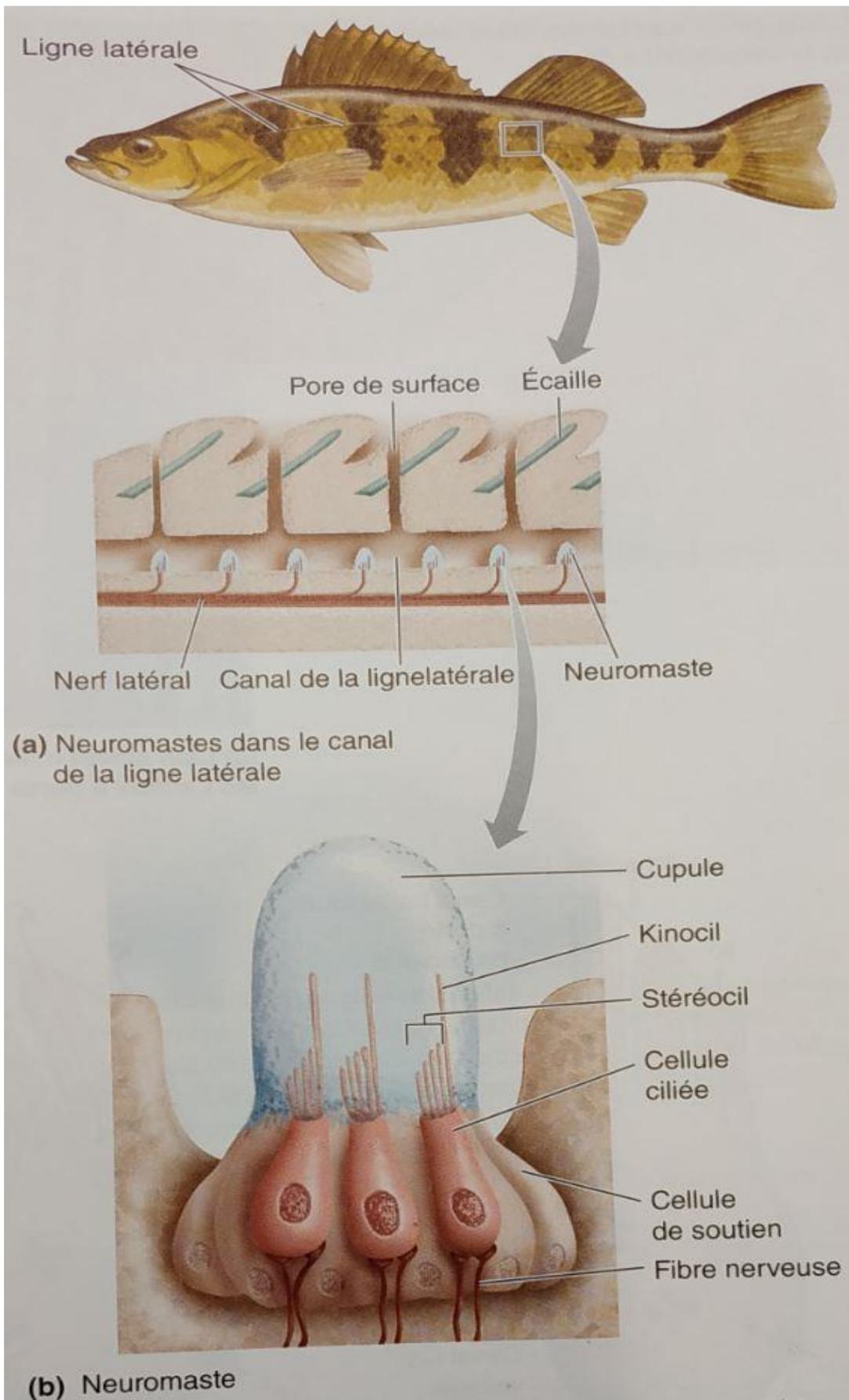


Figure 40: le système de la ligne latérale des poissons

1) Les cellules sensorielles

Elles sont incluses, avec des cellules de soutien et des cellules basales de remplacement, dans des plages épidermiques céphaliques ou troncales, plus ou moins circulaires, les neuromastes (du grec neuron : nerf, et mast : fouet) d'un diamètre de 30 à 800 μm , mais elles peuvent atteindre 3 mm chez les Téléostéens de grands fonds et constituer une ligne sensorielle continue sur toute la longueur du tronc des Élasmobranches. Les neuromastes sont recouverts d'une cupule molle.

2) Répartition

Les neuromastes sont inclus soit dans l'épiderme, soit dans des canaux épidermiques :

- a) Les neuromastes du système canaliculaire : sont propres aux Poissons Ils sont disposés à l'intérieur d'un ensemble de canaux provenant de l'invagination de l'épiderme, mais restant en communication avec le milieu extérieur par des pores (en moyenne, un pore par écaille). La cupule cloisonne le canal comme dans les ampoules des canaux semi-circulaires. L'inertie de l'eau dans le canal à la suite d'une accélération de l'animal (ou du courant d'eau) déforme la cupule et fait fléchir les cils des cellules sensorielles.

Il existe au maximum 4 canaux céphaliques pairs et un canal troncal (figures C-E):

- Les canaux céphaliques sont : supraorbitaire, infraorbitaire, mandibulaire et pré-operculaire (ou hyomandibulaire), connectés ou non, réunis ou non par un canal supratemporal impair.
- Un canal troncal pair, connecté ou non aux canaux céphaliques, continu ou non, voire absent, jusqu'à la racine de la queue.

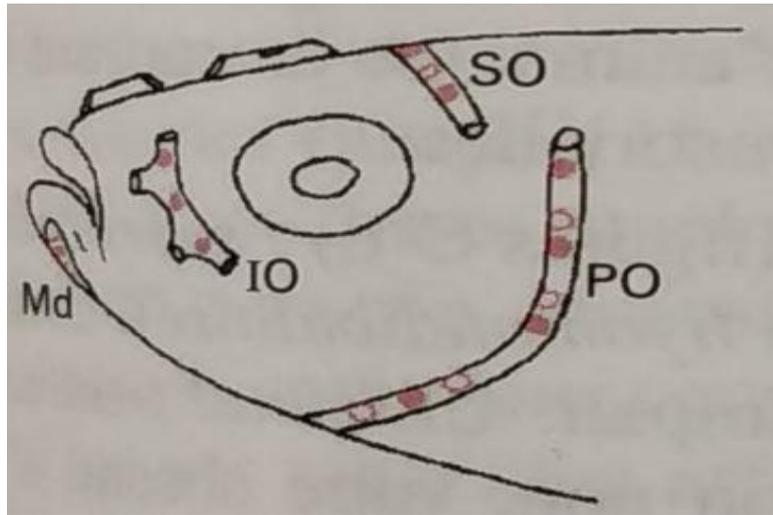


Figure 41: système latérale céphalique d'un Hareng

IO : infra-orbitaire ; SO : supra-orbitaire ; PO : canal pré-operculaire ; Md : canal mandibulaire

- b) Les neuromastes libres ou superficiels : sont distribués en lignes ou champs de densité variable dans l'épiderme des Cyclostomes et des Amphibiens en 4 à 8 paires de lignes céphaliques et 3 paires de lignes troncales chez les larves d'Amphibiens. Ils coexistent avec les neuromastes des canaux chez les poissons (ils colonisent même la nageoire caudale des Téléostéens).

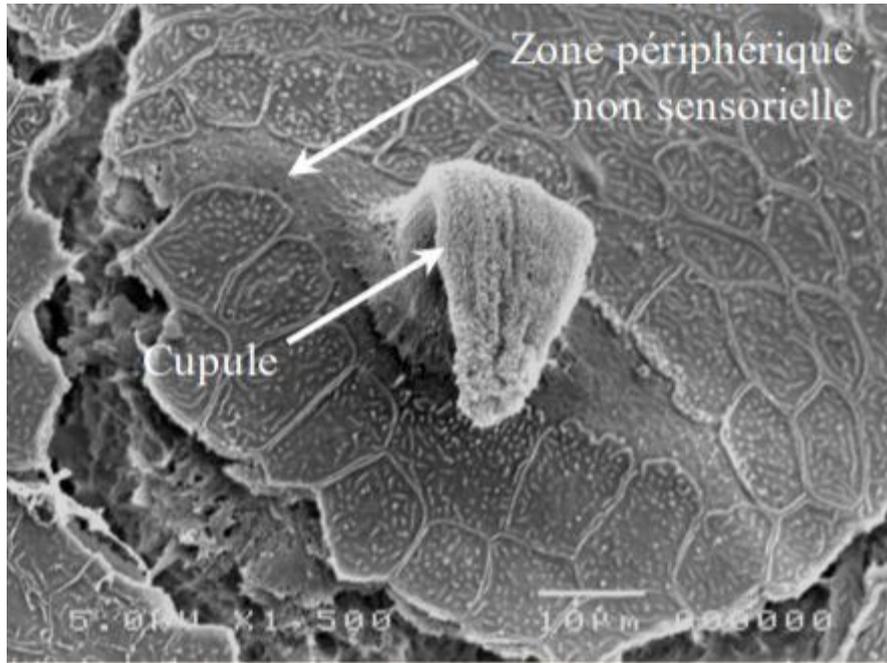


Figure 42: photographie d'un neuromaste superficiel (x1500)

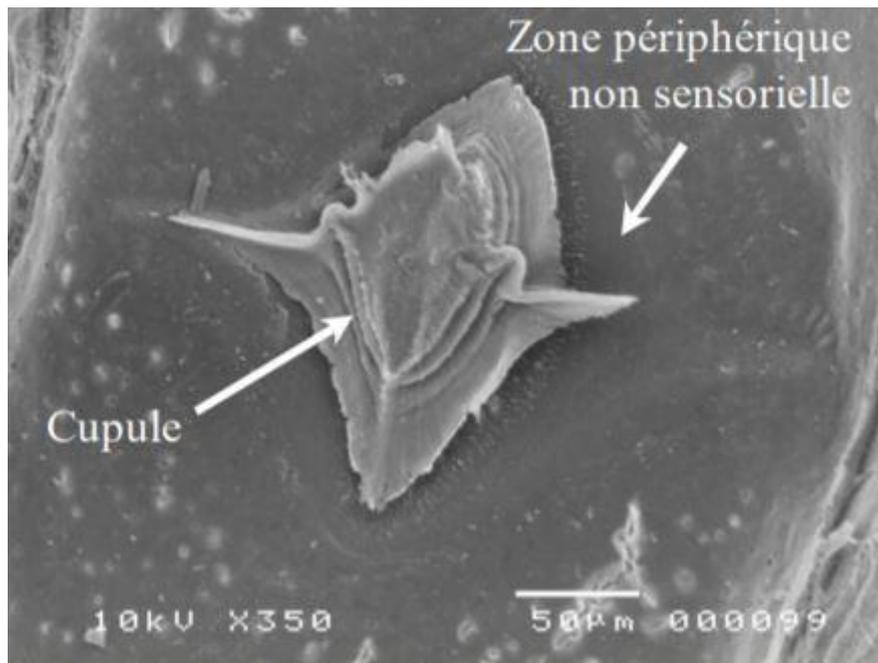


Figure 43: photographie d'un neuromaste des canaux

3) Innervation :

Les neuromastes céphaliques de l'Axolotl (10 à 70 par côté du corps) sont innervés par 4 paires de nerfs latéraux antérieurs associés au trijumeau, au facial et au glossopharyngien. Les neuromastes troncaux (70 à 135 par cote) sont innervés par le nerf latéral postérieur associé au pneumogastrique.

4) Développement :

Contrairement aux autres systèmes sensoriels céphaliques issus d'une seule paire de placodes (système olfactif et stato-acoustique), le système latéral provient de placodes multiples (autant que de lignes ou de champs de neuromastes, soit 5 paires chez les urodèles) qui se différencient généralement en autant de ganglions et de nerf latéraux. Chaque placode s'allonge dans une direction spécifique et essaime à intervalles réguliers, au cours de sa migration, une série linéaire de petits groupes cellulaires, future neuromastes. Dans chaque groupe, après une phase de prolifération, des cellules se différencient en cellules sensorielles cilliées et en neuroblastes qui se détachent et évoluent en neurones ganglionnaires des nerfs latéraux innervant les cellules sensorielles.

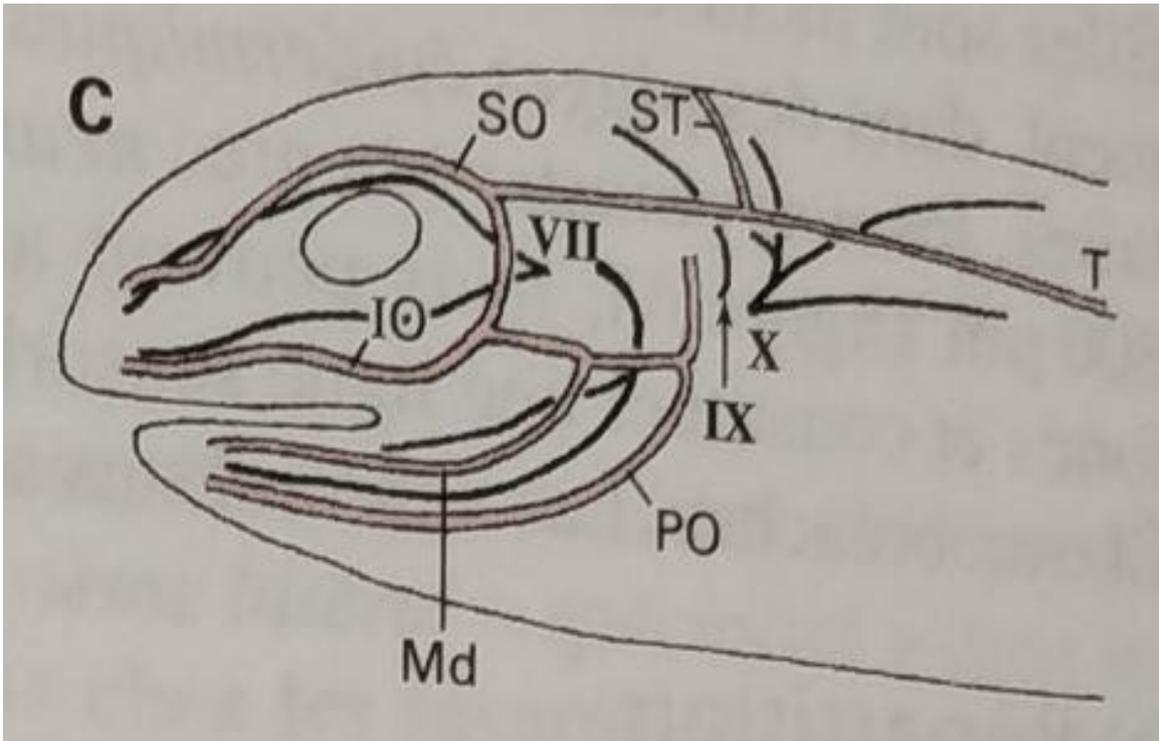


Figure 44: disposition schématique du système canaliculaire d'un poisson et son innervation

IO : infra-orbitaire ; SO : supra-orbitaire ; PO : canal pré-operculaire ;
VII : nerf facial ; X : nerf pneumogastrique ; IX : nerf glossopharyngien

IV. CONCLUSION

Grâce à l'étude de l'anatomie comparée de l'organe sensoriel stato-acoustique, nous avons pu mieux en comprendre l'organisation et l'embryologie.

De ce qui précède nous pouvons dégager trois idées principales :

- Premièrement : l'organe sensoriel de l'équilibre est omniprésent chez tout vertébré quel qu'il soit. Situé au niveau du labyrinthe membraneux, il a pour rôle d'informer le système nerveux central sur la position et les déplacements de la tête dans l'espace;
- Ensuite, on note l'opposition entre les vertébrés aquatiques et les vertébrés terrestres, avec des caractéristiques spécifiques à l'environnement des uns et des autres. Chez les vertébrés aquatiques, le labyrinthe membraneux permet aussi la détection des vibrations de l'eau alors que chez les vertébrés terrestres on voit apparaître un canal cochléaire sensible aux vibrations de l'air et un système de transmission de ces vibrations. D'autre part, on assiste à l'apparition de l'oreille moyenne composée du système de transmission tympano-ossiculaire, qui est situé dans des cavités aériennes interposées entre la peau et l'oreille interne.
- Enfin, on retient l'évolution du système de transmission entre la membrane du tympan et l'oreille interne. Initialement constitué par un seul osselet (columelle) chez les reptiles et les oiseaux, il évolue, grâce à la modification de l'articulation cranio-mandibulaire des reptiles, en un système composé de trois osselets chez les mammifères.

En conclusion, l'organe stato acoustique a une structure différente avec des spécificités inhérentes à chaque espèce, Ces différences sont souvent expliquées par des caractéristiques liées aux milieux de vie.

V. BIBLIOGRAPHIE

1. Bastian. D, Tran ba huy P, *anatomie comparée de l'organe stato acoustique chez les vertébrés 1996 Éditions Scientifiques et Médicales Elsevier SAS. Oto-rhino-laryngologie [20-005-A-10].*
2. PFAFF ET AL. *Functional morphological adaptations of the bony labyrinth in marsupials (Mammalia, Theria). Journal of Morphology. 2017 et 1-8.*
3. H. J. Yi et al., *The temporal bone microdissection of miniature pigs as a useful large animal model for otologic research, Acta Oto-Laryngologica.*
4. André Beaument, Pierre cassier. *BIOLOGIE ANIMALE, Les Cordés: anatomie comparée des vertébrés 9eme édition. paris : DUNOD, 2009.*
5. Hitier Martin, Sato Go, Zhang Yan-feng, Zheng Yiwen, Besnard Stephane, Smith Paul F, Curthoys Ian S. *Anatomy and surgical approach of rat's vestibular sensors and nerves. Journal of Neuroscience Methods.*
6. R. A. Racicot et al. *Neuroanatomy and inner ear labyrinths of the narwhal, Monodon monoceros, and beluga, Delphinapterus leucas (Cetacea: Monodontidae), J. Anat. (2018), doi: 10.1111/joa.12862.*
7. Alain Ghysen, Christine Dambly-Chaudiere *Le développement du système nerveux: de la mouche au poisson, du poisson à l'homme... MEDECINE/SCIENCES 2003 et 19 : 575-81, <http://dx.doi.org/10.1051/medsci/2003195575>.*
8. Shinnosuke Higuchi et al, *Inner ear development in cyclostomes and evolution of the vertebrate semicircular canals (2019 Springer Nature Limited. All rights reserved.), VO L 5 6 5 | N A T U R E | 3 4 7-350.. doi.org/10.1038/s41586-018-0782-y.*
9. (2011), X. Deng et al. *The innerear and its coupling to the swimbladder in the deep-seafish Antimora rostrata (Teleostei: Moridae). Deep-Sea Research I 58.*

10. Schulz–Mirbach T, Heß M, Plath M (2011) *Inner Ear Morphology in the Atlantic Molly Poecilia mexicana—First Detailed Microanatomical Study of the Inner Ear of a Cyprinodontiform Species. PLoS ONE 6(11): e27734. doi:10.1371/journal.pone.0027734.*
11. L. A. JAWAD, (2018) *A comparative morphological investigation of otoliths of six parrotfish species (Scaridae) from the Solomon Islands Journal of Fish Biology.*
12. Schulz–Mirbach et al. *Are accessory hearing structures linked to inner ear morphology? Insights from 3D orientation patterns of ciliary bundles in three cichlid species. Frontiers in Zoology 2014, 11:25.*
13. DIOGO, R. *Origin, evolution and homologies of the Weberian apparatus: a new insight. Int. J. Morphol., 27(2):333–354, 2009.*
14. MASON ET AL.: *The Frog Inner Ear, JARO 16: 171–188 (2015), DOI: 10.1007/s10162–015–0506–z.*
15. Azimzadeh, J.B., Salvi, J.D. *Physiological Preparation of Hair Cells from the Sacculus of the American Bullfrog (Rana catesbeiana). J. Vis. Exp. (121), e55380, doi:10.3791/55380 (2017).*
16. Roger B. J. Benson *Comparative analysis of vestibular ecomorphology in birds J. Anat. (2017) 231, pp990—1018 doi: 10.1111/joa.12726.*
17. doi:10.1371/journal.pone.0066624, Ekdale EG (2013) *Comparative Anatomy of the Bony Labyrinth (Inner Ear) of Placental Mammals. PLoS ONE 8(6): e66624.*
18. 10.1007/s00415–015–7909–y., Hans Straka · Andreas Zwergal· Kathleen E. Cullen. *Vestibular animal models: contributions to understanding physiology and disease. J Neurol (2016) 263 (Suppl 1):S10–S23 DOI.*
19. M. Hitier, et al , *Anatomie comparée du reflex vestibulo–oculaire selon chaque récepteur, Morphologie, Volume 100, Issue 330 September 2016, Page 128.*

20. Wael c et tran bba huy P. *Anatomie des voies vestibulaires centrales. Encycl Chir (Edition scientifiques et medicales elsevier SAS, paris tous droits réservés) Oto-rhino-laryngologie, 20-038-A-10,2001,23p.*
21. Schmidt-Nielsen, Knut. *Physiologie animale :Adaptation et milieux de vie. duke : Dunod, 1997.*
22. *Animal physiology : from genes to organisms, by Lauralee Sherwood, Hillar klandorf and Paul H.yancey, ©2013, 2005 Brooks&Cole, Cengage learning.*
23. *le. Saunders et al. Reptile and Bird Middle Ear. Springer-Verlag New York, Inc. 2000. DOI: 10.1007/978-1-4612-1182-2_2.*
24. Gagno Stéphane¹ *L'audition chez les chéloniens Cas de la Tortue d'Hermann Nature de Provence – Revue du CEN PACA, 2013 N°2, 91-98.*
25. R.J. Dooling and S.C. Therrien *Hearing in Birds: What Changes From Air to Water Springer Science+Business Media, LLC 2012 DOI 10.1007/978-1-4419-7311-5_17,.*
26. PFAFF ET AL., *The vertebrate middle and inner ear: A short overview, Journal of Morphology. 2018 et 1-8., DOI: 10.1002/jmor.20880.*
27. Ole Næsbye Larsen · Jakob Christensen-Dalsgaard · Kenneth Kragh Jensen, *Role of intracranial cavities in avian directional hearing, Biol Cybern (2016) 110:319-331 DOI :10.1007/s00422-016-0688-4.*
28. N. Anthwal and H. Thompson, *The development of the mammalian outer and middle ear, J. Anat. (2016) 228, pp217-232, doi: 10.1111/joa.12344.*
29. Miller S.A. et Harley J.P., *ZOOLOGY, 9th edition, Published by McGraw-Hill, New York. Copyright © 2013 by The McGrax-Hill Companies,Inc. All rights reserved. The French edition © 2015 by De Boeck supérieur. All rights reserved.*

30. H. Neumeister and B. U. Budelmann *Structure and function of the Nautilus statocyst. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B (1997) 352, 1565{1588.*
31. W. Graf, F. Klam , *Le système vestibulaire : anatomie fonctionnelle et comparée, évolution et développement, C. R. Palevol 5 (2006) 637-655, doi:10.1016/j.crpv.2005.12.009.*