

La physiologie de l'audition

Module de physiologie

Cours de neurophysiologie - Dr Marref .W

Objectifs

- Décrire le stimulus sonore
- Expliquer la physiologie de l'oreille externe et moyenne.
- Exposer la structure de l'oreille interne (organe de Corti).
- Décrire les propriétés mécaniques de l'oreille interne.
- Définir la tonotopie dans la membrane basilaire et de la cochlée
- Décrire les propriétés physiologiques des cellules de l'oreille internes.
- Expliquer les étapes de transmission et transduction des ondes sonores en un signal nerveux propagé.
- Décrire les étapes d'intégration et d'interprétation des messages nerveux auditifs.
- Exposer les données physiopathologiques et d'exploration de l'audition.

I-Introduction

Le système auditif joue un rôle important dans la vie de l'individu.

L'homme étant capable de produire et d'entendre une large variété de sons, le langage Parlé (support privilégié des échanges humains) et sa perception à travers le système auditif est ainsi un moyen très important de communication

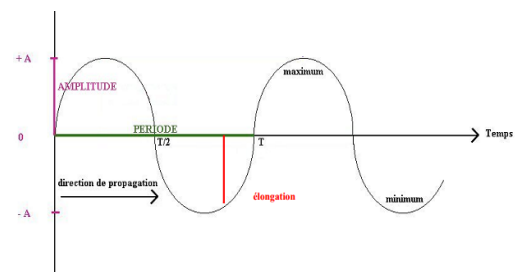
L'audition est d'une importance capitale car tout au long de l'existence, l'oreille contrôle la voix et régule son émission

L'audition n'est pas interrompue par l'obscurité et peu par les obstacles et donc plus Importante que la vision pour la survie (activation du système réticulaire et donc de l'attention qui permet de rester en alerte vis-à-vis des sons de l'environnement)

II) Propriétés de l'onde sonore

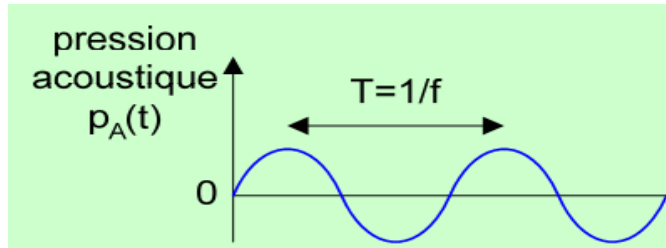
Le son est produit par l'ébranlement des particules du milieu où se trouve un corps qui vibre.

Le son se propage dans le milieu : l'air mais aussi liquide, gaz, solide sous la forme d'une onde élastique (il ne se propage pas dans le vide)



On assiste à des modifications de la pression de l'air: phases de compression et phases de détente

Intensité sonore : traduit l'amplitude de la vibration qui la produit (variation de pression)



Très large, elle est exprimée en décibel allant de 0 à 120 dB (unité logarithmique pour décrire un rapport de pression)

Fréquence sonore : le cycle sonore est la distance entre deux plages successives

-Exprimée en Hz : nombre de cycles/sec

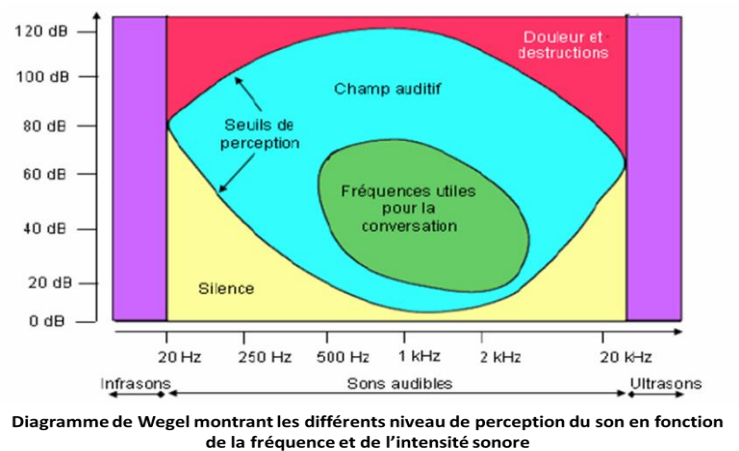
-Un son peut être pur, comporter des harmoniques (définissant le timbre musical) ou complexe

-Chez l'homme ,le spectre des sons audibles est de 20 Hz à 20 000 Hz

-Vitesse de propagation: est constante dans un milieu homogène

Air: 340 m/sec

Eau:1435 m/sec



III/Anatomie de l'oreille

Oreille externe : pavillon en forme d'entonnoir avec des replis ,auquel fait suite le

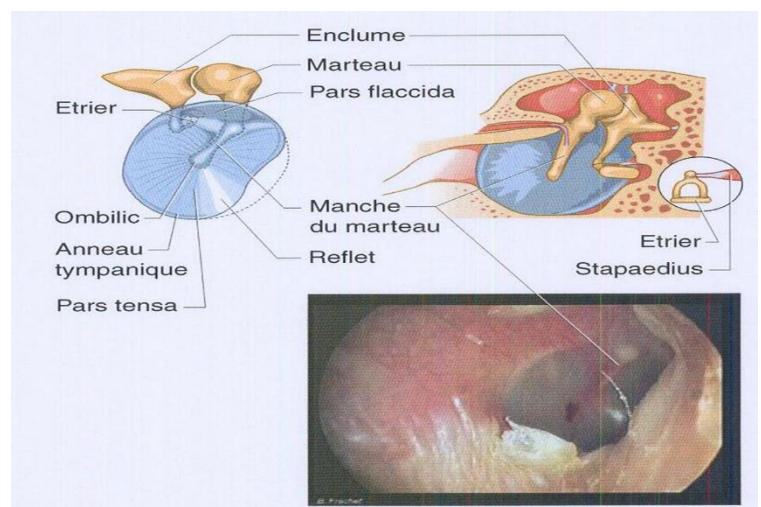
Conduit auditif externe (Longueur=2,5 cm Diamètre=0,7 cm)

Oreille moyenne : fait suite au conduit auditif externe et formée par la caisse du tympan

-membrane tympanique : forme conique pénétrant dans L'oreille moyenne

-chaîne des osselets : 3 petits os articulés entre eux (formant un bras de levier)

Sur la face opposée au tympan ,la caisse du tympan présente deux ouvertures : la fenêtrovale et la fenêtro ronde



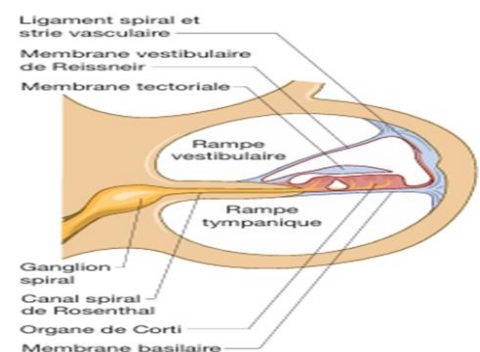
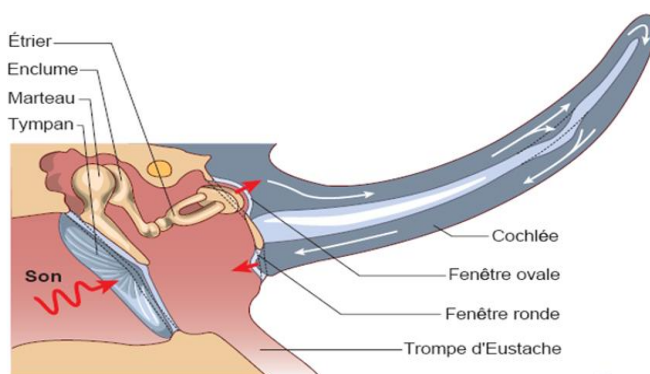
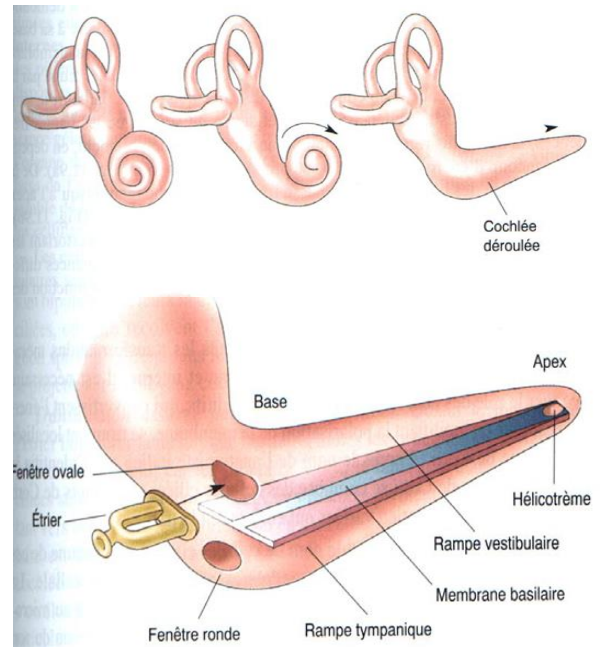
La partie plate de l'étrier s'articule comme un piston sur la fenêtrovale,

Les osselets sont reliés aux parois de la caisse par des ligaments et deux muscles : muscle tenseur du tympan (innervé par le V) et muscle stapedius (innervé par le VII)

La caisse du tympan communique avec le pharynx par la trompe d'Eustache

L'oreille interne

Est constituée du labyrinthe osseux (cochlée), qui contient le labyrinthe membranaire. Chez l'homme, **la cochlée** est une structure hélicoïdale à deux tours et demie. Pour mieux la comprendre, il faut l'imaginer déroulée ; elle a alors 22 mm de long. Elle se présente comme un tube conique dont la base comporte deux orifices obstrués par une membrane : la fenêtre ovale en haut, sur laquelle s'appuie l'étrier, la fenêtre ronde en bas. Entre les deux, la membrane basilaire sépare longitudinalement ce cône en une rampe **vestibulaire** (supérieure) sur laquelle s'ouvrent la fenêtre ovale et une rampe **tympanique** (inférieure) sur laquelle s'ouvre la fenêtre ronde. La membrane basilaire supporte **l'organe de Corti**, inclus dans le canal cochléaire. Ce dernier, de section triangulaire, est délimité en bas par la membrane basilaire, en haut par la membrane vestibulaire de Reissner et en dehors par le ligament spiral et la strie vasculaire. Au sommet, les deux rampes communiquent par un trou, l'hélicotrème. Mécaniquement, l'étrier qui appuie sur la membrane de la fenêtre ovale crée une surpression qui pousse vers le bas la membrane basilaire. Cette pression se transmet à la rampe tympanique à travers l'hélicotrème et se termine au niveau de la fenêtre ronde.



L'organe de Corti

L'organe de l'audition, repose sur la membrane basilaire. C'est un organe spiralé formé d'un feuillet enroulé de cellules épithéliales, qui comprend des cellules de soutien et 16000 cellules ciliées environ, les récepteurs sensoriels de l'audition. Il existe deux groupes de cellules ciliées. Les cellules ciliées internes se trouvent en position médiale, sur une seule rangée, et s'étendent sur toute la longueur de la cochlée. Les cellules ciliées externes sont disposées sur plusieurs rangées.

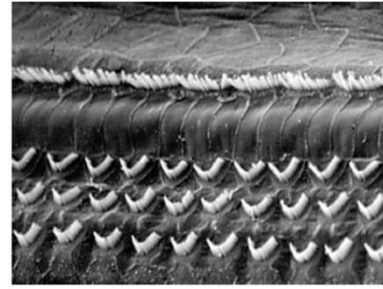
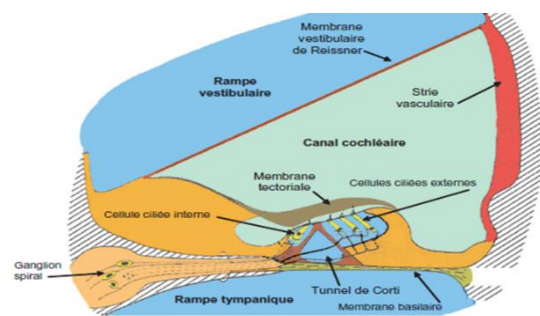


Figure 7.9. Les rangées de cellules ciliées auditives. En haut : la rangée de cellules ciliées internes. En bas : les trois rangées de cellules ciliées externes. Photo de Marc Lenoir, extrait de Promenade autour de la cochlée (www.cochlee.info), R. Pujol et al., INSERM et université Montpellier 1 ; reproduit avec l'autorisation de R. Pujol et M. Lenoir.

L'extrémité apicale des cellules ciliées est pourvue de longs prolongements ciliaires qui pénètrent dans l'endolymphe du canal cochléaire. La base des cellules fait synapse avec **les fibres de la branche cochléaire du nerf vestibulo-cochléaire** (nerf crânien VIII). Une membrane gélatineuse fragile et souple, **la membrane tectoriale**, se projettent au dessus des cellules sensorielles ciliées de l'organe de Corti avec lesquelles elle entre en contact.



IV) Physiologie de l'oreille externe

L'oreille externe se comporte comme une antenne acoustique : le pavillon (associé au volume crânien) diffracte les ondes.

- 1) Le conduit auditif externe joue le rôle de résonateur induisant une pression acoustique au niveau de la membrane tympanique supérieure à celle présente à l'entrée du CAE
- 2) Rôle dans la localisation des sources sonores :

Permet de distinguer les sons provenant de l'avant ou de l'arrière de la tête

L'effet de la tête sur la pression acoustique des sons dépend de la fréquence des sons et de l'angle d'incidence de l'onde sonore (direction de la source sonore).

La différence entre les temps d'arrivée de l'onde sonore aux 2 oreilles de même que la différence entre les intensités de l'onde sonore au niveau de l'oreille constituent des paramètres indispensables pour l'analyse de la localisation de la source de l'onde sonore.

V) Physiologie de l'oreille moyenne

L'oreille moyenne transfère le son du milieu aérien (oreille externe) au milieu liquide de la cochlée (oreille interne).

L'oreille moyenne joue un rôle **d'ADAPTATEUR D'IMPEDANCE** adaptant l'impédance relativement faible du milieu gazeux à celle plus élevée du milieu liquidien de l'oreille interne

Le gain assuré par l'oreille moyenne dépend de la fréquence du son est d'environ 30 dB pour les fréquences moyennes (1000 à 2000 Hz)

C'est la différence entre la force qui s'exerce sur la fenêtre ovale et celle s'exerçant sur la fenêtre ronde qui induit le mouvement du liquide de la cochlée la force au niveau de la fenêtre ovale est plus grande que celle au niveau de la fenêtre ronde en raison du gain assuré par l'oreille moyenne

Rôle de protection de l'oreille moyenne

Assurée par la contraction reflexe (polysynaptique) des muscles : tenseur du tympan et muscle stapedius

C'est une contraction reflexe lors des intensités sonores élevées (sup à 70 dB) et permet une atténuation du niveau sonore d'environ 10 dB surtout pour les basses fréquences .

VI) Physiologie de l'oreille interne

Les vibrations de la fenêtre ovale sont transmises par les différentes rampes jusqu'à la fenêtre ronde, les liquides étant incompressibles ,la fenêtre ronde vibre donc au rythme de l'étrier

Les mouvements de liquide dans la rampe vestibulaire induit une déformation des membranes limitant le canal cochléaire (m° basilaire et m° tectoriale)

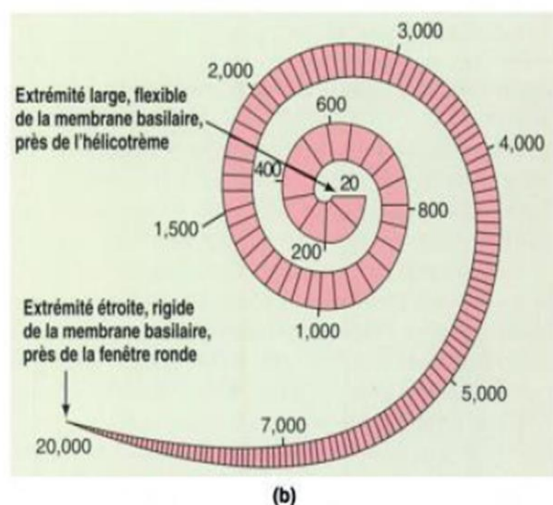
Il en résulte **un fléchissement rythmique des cils des cellules réceptrices.**

A°PROPRIETES MECANQUES DE LA MEMBRANE BASILAIRE

La MB est **plus large à l'apex** qu'à la base (100 µm pour 500) et 100 fois plus rigide à la base qu'à l'apex.

Le mouvement de la périlymphe induit l'apparition d'une onde à la base de la MB et qui se propage de la base vers l'apex

Selon la conception passive (de Von bekezy), toute la membrane basilaire vibre de proche en proche Jusqu'à un point de vibration maximale au niveau de la MB et qui dépend de **la fréquence de l'onde sonore** .Les points qui répondent aux fréquences **élevées** sont à **la base** de la membrane basilaire, ceux qui répondent **aux basses fréquences** sont à **l'apex**, ceci constitue une représentation topographique des fréquences en d'autres termes **une tonotopie** .



(b)
Les nombres indiquent la fréquence en cycles par seconde auxquelles les différentes régions de la membrane basilaire vibrent de manière maximale.

B) Mécanisme de transduction

La cochlée sépare les sons selon leur fréquence, cette fonction est assurée grâce au mode de **vibration de la membrane basilaire et à l'électromotilité des cellules ciliées externes**

La transduction est assurée par **les cellules ciliées internes**

Les cellules ciliées externes agissent comme des moteurs pour amplifier les vibrations de la membrane basilaire, il s'agit de l'amplificateur cochléaire qui améliore la sensibilité aux sons de faible intensité et améliore la discrimination des fréquences.

• Mécanisme de transduction par les cellules ciliées

- Les stéréocils des cellules sensorielles sont le siège de la transduction mécano-électrique, c'est-à-dire de la transformation de la vibration sonore en message nerveux interprétable par le cerveau.

- Les vibrations de la membrane basilaire issues de la différence de pression hydraulique entre les rampes tympanique et vestibulaire induisent un cisaillement de la membrane tectoriale.

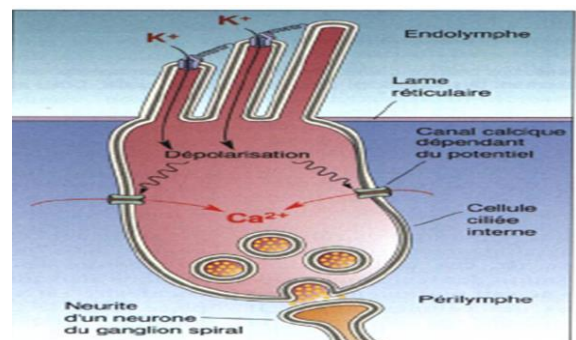
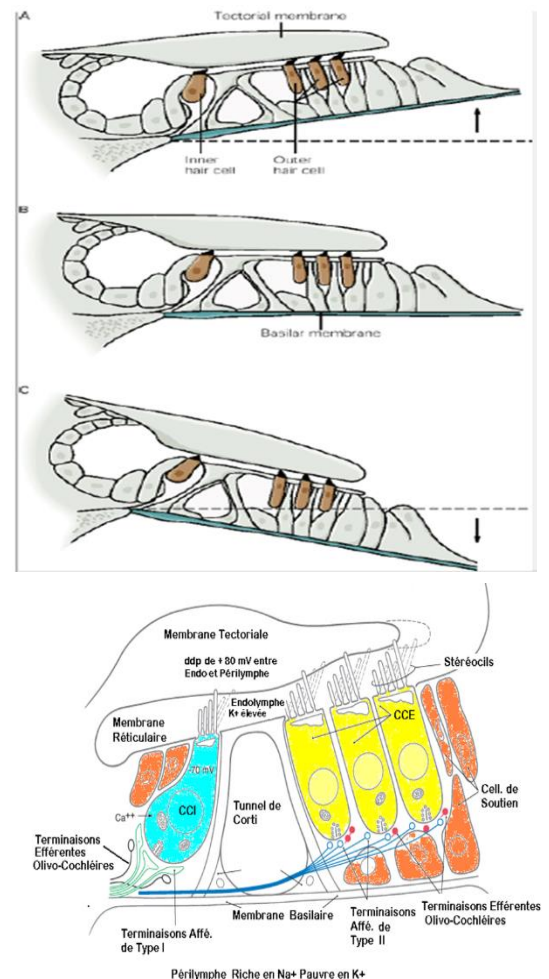
- La dépolarisation des cellules ciliées est liée à l'ouverture de canaux cationiques probablement situés au sommet des stéréocils. Plusieurs types de liens unissent les différents stéréocils. Les liens apicaux constitués de myosine permettent l'ouverture simultanée de canaux ioniques qui laissent alors passer le K^+ et du Ca^{2+} .

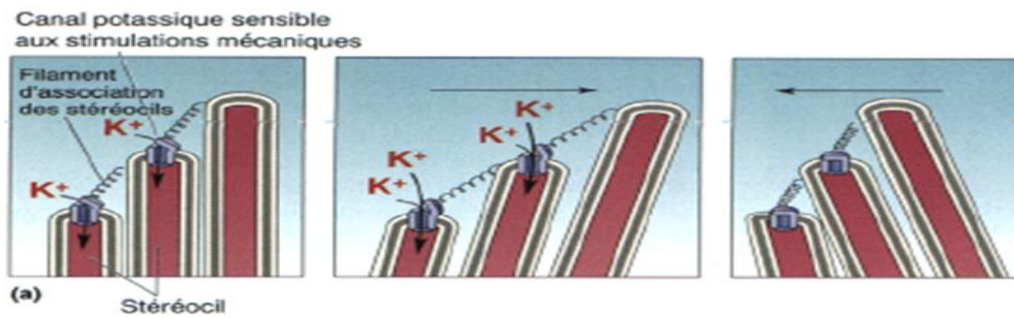
- L'influx de K^+ dans la cellule ciliée est responsable du changement de potentiel membranaire, proportionnel à l'intensité acoustique du son stimulant.

Au niveau des CCI, la dépolarisation entraînera une augmentation de la décharge dans les fibres afférentes du nerf auditif, proportionnelle à l'amplitude de la flexion.

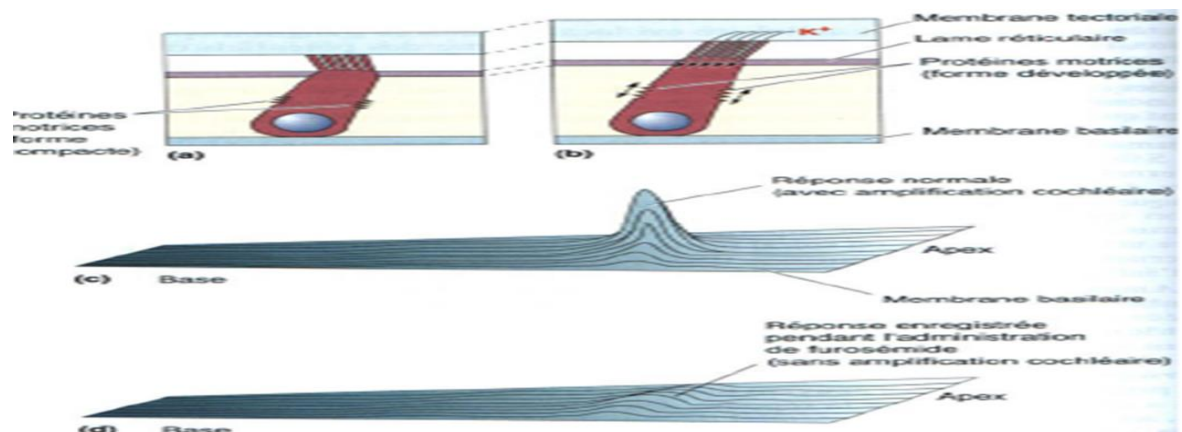
- **Au niveau des CCE**, la dépolarisation entraînera un changement de longueur de la cellule, à la même fréquence que celle du son stimulant.

Les CCEs sont donc capables à la fois de transmettre le mouvement de l'organe, et de produire des forces qui agissent en retour sur cet organe selon un mode unique de mobilité cellulaire. Cette mobilité prend la forme d'une variation de longueur, voltage dépendante. Donc joue le rôle d'amplification mécanique





PROPRIETES MECANIQUES DES CCE (propriétés électromécaniques)



Mobilité latérale des CCE lui permettant d'entrer en résonance avec le stimulus sonore et l'amplification du signal grâce à une protéine contractile

c) Innervation des cellules ciliées :

1. Les cellules ciliées internes (CCI)

Les afférences sont myélinisées à conduction rapide et haut niveau de divergence : 3500 CCI divergent vers 20 000 fibres auditives

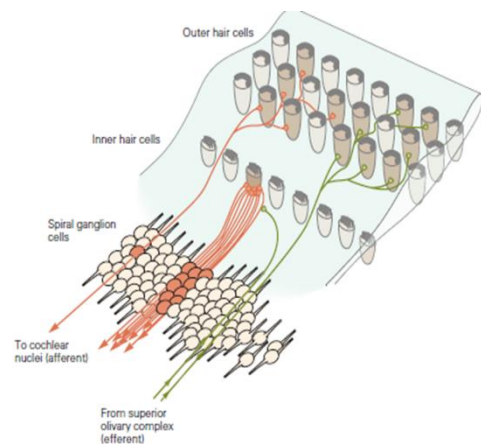
2. Les cellules ciliées externes (CCE)

Les afférences sont non amyéliniques

de conduction lente avec haut niveau de convergence: 20000 CCE convergent vers 1000 fibres du nerf auditif

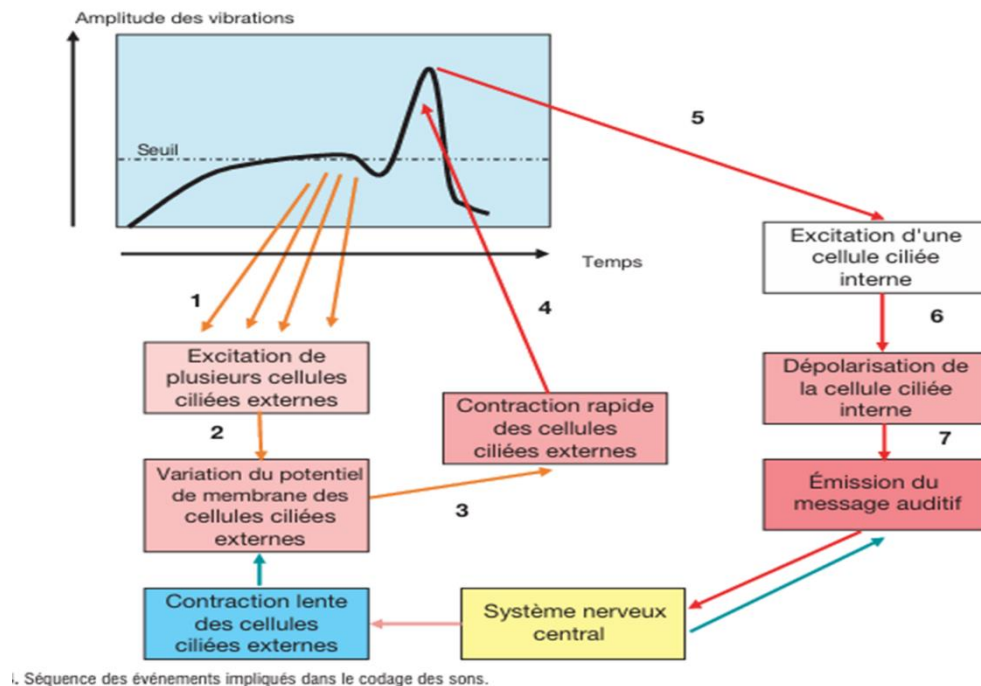
La majorité des fibres nerveuses afférentes se terminent sur les cci dont chacune reçoit près de 10 axones . Peu de fibres afférentes assurent une innervation diffuse des CCE

les fibres éfferentes innervent directement et surtout les CCE . l'innervation éfferente des CCI est moins importante et est de type axo-axonique .



Une fois excitées, **les cellules ciliées internes** envoient leurs messages en **libérant du glutamate** via les dendrites (fibres myélinisées, donc de conduction rapide) des cellules secondaires se trouvant dans le **ganglion spiral vers** le noyau cochléaire.

En retour, **des fibres inhibitrices** viennent du noyau cochléaire sur les cellules ciliées externes, les **hyperpolarisant**, et donc **arrêtent le processus amplificateur de façon réflexe**.



Au niveau du nerf auditif : les enregistrements unitaires montrent qu'un neurone est particulièrement sensible à une fréquence (appelée fréquence caractéristique) et moins sensible aux fréquences proches.

Les neurones ayant une FC (fréquence caractéristique) semblable ont des terminaisons proches au niveau des noyaux de relai, il existe une cartographie de la membrane basilaire au niveau des noyaux cochléaires.

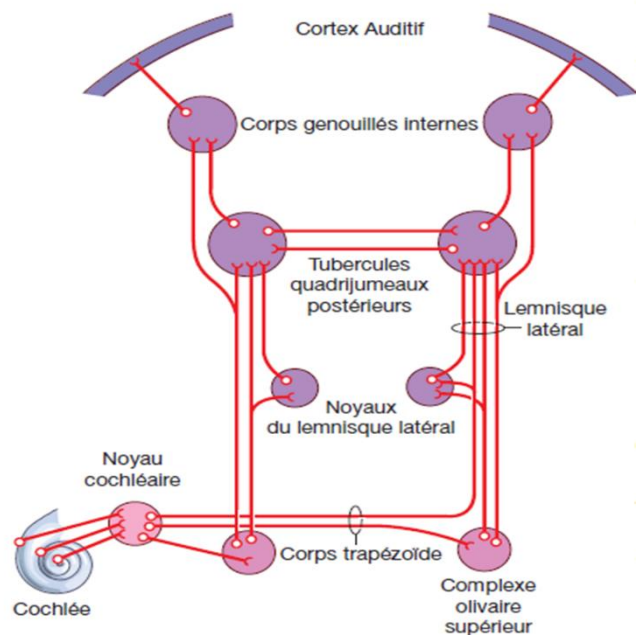
Cette organisation du système auditif basée sur la fréquence caractéristique est appelée **tonotopie**.

VII) Mécanismes centraux (voies de l'audition)

L'information auditive est transmise de l'organe récepteur (oreille) jusqu'au cortex suivant un grand nombre de voies complexes dans le tronc cérébral, le mésencéphale et le thalamus auditif.

Les fibres issues du ganglion spiral forment le nerf auditif et se projettent au niveau du bulbe sur le **noyau cochléaire** (qui présente une subdivision dorsale et ventrale).

- De la région **ventrale** : part un tractus ventral **vers le complexe olivaire supérieur ipsi et Contralatéral**



Les axones olivaires suivent le lemnisque latéral pour se terminer dans le colliculus inférieur (CI) du mésencéphale.

- De la région **dorsale** part un tractus dorsal qui se projette sur le lemnisque latéral puis sur le CI « Toutes les voies auditives se projettent sur le CI »

Les neurones du CI se projettent vers le **corps genouillé médian (CGM)** ou thalamus auditif lequel envoie des projections vers le cortex auditif primaire au niveau du lobe temporal.

Notons :

« la bilatéralité et la redondance des voies »

le colliculus inférieur envoie aussi des axones vers le colliculus supérieur et le cervelet

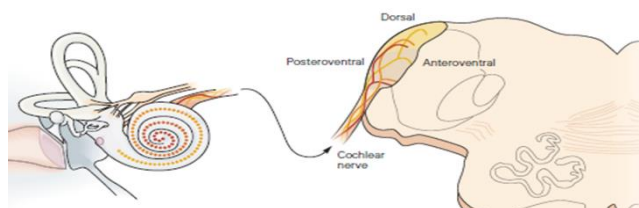
le tronc cérébral envoie des axones vers les CCE (rétrocontrôle)

le cortex auditif envoie des projections en retour Vers le CGM et le tronc cérébral

Noyaux cochléaires

La représentation tonotopique basilaire est conservée dans de multiples projections

au niveau du noyau cochléaire avec une diversité de cellules à propriétés distinctes

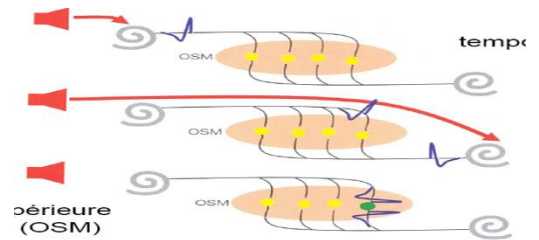


LOCALISATION DU SON : ROLE DU COMPLEXE OLIVAIRE SUPERIEUR (COS)

compare l'activité des neurones des deux noyaux cochléaires

plusieurs circuits sont mis en jeu permettant l'analyse de la différence interaurale en fréquence (Olive Supérieur Médian) et en amplitude (O S Latéral)

Pour les basses fréquences(inferieures à 03 KHz): détection de la différence interaurale de temps (déphasage interaural) par la présence de neurones de coïncidence (en vert) au niveau de l'olive supérieur médian (OSM)



CORTEX AUDITIF: organisation tonotopique

Situé dans le lobe temporal(occupe la première circonvolution temporale T1,le gyrus de Heschl et Le planum temporal) .il comprend l'aire auditive primaire A I et secondaire A II

Il existe une représentation tonotopique en bandes d'isofréquences avec une représentation de la binauralité (perpendiculaire)

Alternance de bandes de cellules EE (excitées excitées) et de Cellules E I (excitées-inhibées)

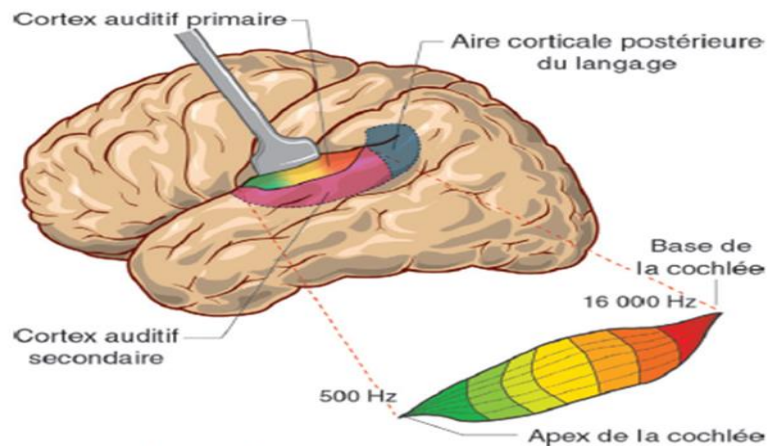


Figure 7.17. Cortex auditif primaire (multicolore), secondaire (rouge) et tonotopie de l'aire auditive primaire. On notera que l'aire postérieure du langage (bleu) se trouve en arrière des aires auditives corticales.

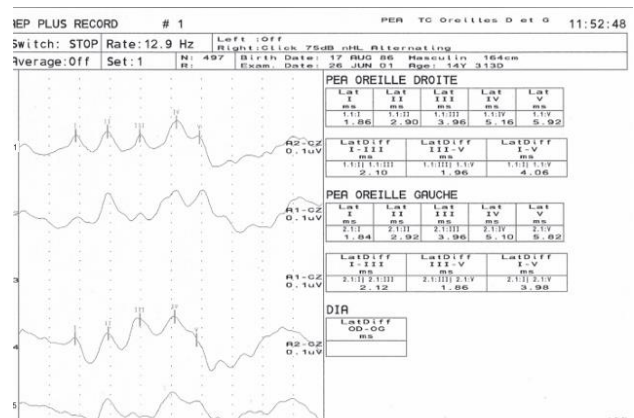
Organisation du cortex auditif :

- **Cellules de type EE (excitation excitation):** excitées par les deux oreilles
- **Cellules de type EI (excitation inhibition):** excitées par l'oreille controlatérale, inhibées par l'oreille homolatérale.

VIII) Exploration de système auditif

1°Potentiel évoqué auditif : enregistrement des influx nerveux des voies auditives conduisant le son de l'oreille interne vers les aires auditives primaires du cerveau.

Il permet d'enregistrer cinq ondes principales numérotées de I à V la première (I), avec une latence de 1 ms, correspond au potentiel du nerf auditif ; les autres correspondent aux différents relais des noyaux du tronc cérébral.



2°Oto-émissions acoustiques provoquées : La recherche des oto-émissions acoustiques provoquées (OEAP) est une mesure objective d'évaluation cochléaire qui consiste à envoyer une fréquence donnée dans l'oreille et à rechercher les oto-émissions dans un microphone. Elle permet d'explorer indirectement la fonction des cellules auditives ciliées externes, qui sont précocement touchées par les pathologies de l'oreille interne.

