

UNIVERSITE TUNIS EL MANAR
FACULTE DE MEDECINE DE TUNIS

.....



PCEM2

THÈME XI
NEUROSENSIBILITÉ,
NEUROMOTRICITÉ,
NEUROCONTRÔLE,
FONCTIONS COGNITIVES

.....
ANNÉE UNIVERSITAIRE 2016-2017

www.fmt.rnu.tn

PLAN

NEUROANATOMIE	3
1. Le cerveau (I) : Configuration externe (cortex)	4
2. Le cerveau (II) : Substance grise profonde	9
3. Le système ventriculaire	13
4. La substance blanche du cerveau	15
5. Les voies optiques	21
6. Le tronc cérébral	26
7. La moelle épinière	35
8. Le cervelet	41
9. La vascularisation cérébrale	49
10. Sinus caverneux, coupe frontale (la voie motrice volontaire)	56
11. Les voies de la sensibilité	60
PHYSIOLOGIE	67
12. Transmission synaptique et neurotransmetteurs	68
13. Les fonctions motrices de la moelle épinière et les réflexes médullaires	75
14. Fonctions statiques et équilibration	82
15. Le cervelet	89
16. Fonctions motrices des noyaux gris de la base	93
17. Le contrôle cortical de la motricité	96
18. Somesthésie	102
19. L'électroencéphalogramme	107
20. Potentiels évoqués	110
HISTOLOGIE EMBRYOLOGIE	112
21. Histologie du système nerveux	113
22. Embryologie du système nerveux	141
23. Histologie et embryologie de l'œil	156
24. Histologie et embryologie de l'oreille et des autres organes des sens	168
BIOPHYSIQUE	183
25. Dioptrique oculaire	184
26. Sensation visuelle	205
27. La sensibilité de l'œil à l'intensité physiologique de la lumière	207
28. La vision des couleurs	223
29. La psychoacoustique	237
30. Transmission transduction	242
31. Exploration de l'audition	249
FONCTIONS COGNITIVES	255
32. Développement cognitif	256
33. Bibliographie	260
34. Le langage	261

PCEM2

THEME XI NEUROANATOMIE

LE CERVEAU (I) CONFIGURATION EXTERNE(CORTEX)

I- CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

Le cerveau est une masse ovoïde à grosse extrémité postérieure et à base aplatie, située dans la grande loge cérébrale du crâne et divisée par la fissure longitudinale (ou scissure interhémisphérique) en deux hémisphères symétriques, droit et gauche qui sont unis sur leurs faces médiales par les commissures interhémisphériques, en particulier le corps calleux qui est une bande épaisse de substance blanche.

Le cerveau mesure 16 cm de long, 14 cm de large et 12 cm de haut, et pèse 1370 g en moyenne. Sa surface lisse jusqu'au troisième mois de la vie embryonnaire se plisse ultérieurement en raison du développement considérable de l'écorce cérébrale ou cortex. Ainsi des sillons profonds (ou primaires) constants délimitent les lobes, et des sillons moins profonds dits secondaires et plus variables délimitent les gyri (ou circonvolutions). Cette disposition augmente la surface du cerveau et seul un tiers de la surface du cortex apparaît à la surface des hémisphères.

Le cerveau est formé de deux parties :

- une partie impaire, médiane et basale, le cerveau intermédiaire ou diencephale, faisant suite en quelque sorte au tronc cérébral
- une partie supérieure, recouvrant le diencephale, composée des deux hémisphères cérébraux, c'est le cerveau hémisphérique ou télencéphale.

Pour un hémisphère, on décrit trois faces, trois bords et trois extrémités ou pôles : frontal, temporal et occipital.

La face externe est convexe, située entre le bord supérieur et le bord externe. La face inférieure est située entre les bords externe et interne et repose sur les étages antérieur et moyen de la base du crâne ainsi que sur la tente du cervelet qui la sépare de la fosse postérieure. La face interne n'est visible qu'après la section sagittale médiane du cerveau, le long de la scissure interhémisphérique, passant par le corps calleux.

La substance grise du cerveau est dispensée de deux façons :

- en couche continue périphérique et superficielle qui représente l'écorce ou cortex cérébral.
- en amas profonds, situés à la base du cerveau, constituant les noyaux gris centraux.

La substance blanche est située sous le cortex et autour des noyaux gris de la base.

II- DIVISION MORPHOLOGIQUE DU CORTEX

Les scissures, visibles sur la face externe du cerveau, divisent l'hémisphère en 4 lobes ; les principales sont (figure 5 et 6) :

- la **scissure de Sylvius** qui sépare le lobe temporal des lobes frontal et pariétal
- la **scissure de Rolando** qui sépare le lobe frontal du lobe pariétal.
- la **scissure perpendiculaire externe** qui sépare le lobe pariétal du lobe occipital.

Au fond de la scissure de Sylvius, se trouve caché un cinquième lobe, le **lobe insulaire** (ou Insula), à fonction mal connue.

1- LOBE FRONTAL

1.1- MORPHOLOGIE :

C'est le mieux délimité avec en avant le pôle frontal, en arrière la scissure de Rolando qui le sépare du lobe pariétal et en bas, la scissure de Sylvius qui le sépare du lobe temporal.

Trois sillons subdivisent le lobe frontal : deux sillons horizontaux, le sillon frontal supérieur et le sillon frontal inférieur et un sillon vertical ; le sillon prérolandique ou précentral, situé à leurs extrémités postérieures.

Ces trois sillons divisent le lobe frontal en quatre circonvolutions frontales : trois circonvolutions frontales horizontales (frontale supérieure (F1), frontale moyenne (F2) et frontale inférieure (F3)) et une circonvolution verticale, la circonvolution frontale ascendante (FA) appelée encore circonvolution prérolandique ou précentrale.

La troisième circonvolution F3 est subdivisée par deux petits sillons ascendants, qui partent de la scissure sylvienne, en trois parties d'avant en arrière : le segment orbitaire, le cap et le pied.

1.2- FONCTIONS :

Le lobe frontal est essentiellement celui de la motricité, il est le point de départ du faisceau pyramidal qui naît de la circonvolution frontale ascendante. On y trouve représentée la carte de la moitié du corps controlatéral, carte qui est

dessinée à l'envers ; c'est-à-dire que la tête est en bas, puis vient le membre supérieur, le thorax, l'abdomen et en haut le membre inférieur, le pied est représenté sur la face interne de la circonvolution frontale ascendante (FA) (figure 10).

La représentation des différentes parties du corps est disproportionnée. Elles sont représentées en fonction de la finesse et de la précision de leurs mouvements. La main et la tête y occupent notamment un territoire énorme.

Au niveau de la partie postérieure de F3 (pied de F3) est située l'aire de Broca qui est responsable de l'expression du langage. Sa destruction entraîne une aphasie d'expression (aphasie de Broca).

2- LOBE PARIÉTAL

2.1-MORPHOLOGIE :

Il est limité en avant par la scissure de Rolando, en bas par la scissure de Sylvius et en arrière par le lobe occipital.

Le lobe pariétal est divisé par deux sillons : un sillon horizontal, le sillon pariétal et un sillon vertical situé en avant de ce dernier, le sillon post-central (parallèle à la scissure de Rolando).

Le sillon pariétal délimite deux circonvolutions horizontales, la circonvolution pariétale supérieure (P1) et la circonvolution pariétale inférieure (P2).

Entre la scissure de Rolando et le sillon post-central, on trouve la circonvolution pariétale ascendante (PA).

2.2- FONCTIONS :

Le lobe pariétal est principalement sensitif avec des aires de projection où se terminent les fibres de la sensibilité et des aires d'interprétation ou aires associatives.

Les aires de projection de la sensibilité tactile, thermique, proprioceptive sont situées dans la circonvolution pariétale ascendante (PA). Une carte représentant l'hémicorps controlatéral peut être établie comme pour l'aire motrice (figure 10).

Des aires situées sur P2 à gauche chez les droitiers sont rattachées au langage :

- une zone située à la jonction du lobe pariétal et occipital qui permet la lecture et la compréhension des mots écrits. Sa lésion entraîne une alexie ou cécité verbale (incapacité de lire).
- une zone située plus en avant, à proximité de la circonvolution temporale supérieure, permet d'écrire. Sa lésion entraîne une agraphie.

3- LOBE TEMPORAL

3.1- MORPHOLOGIE :

C'est un lobe très volumineux chez l'homme. Il est bien séparé en haut du lobe frontal et du lobe pariétal par la scissure de Sylvius. En arrière, il n'a pas de limites nettes avec le lobe occipital.

Il contient 4 sillons qui sont :

- à la face externe, le sillon temporal supérieur et le sillon temporal inférieur.
- à la face inférieure et interne, les sillons latéral et médial.

Entre ces sillons on trouve 5 circonvolutions :

- à la face externe, la circonvolution temporale supérieure (T1), moyenne (T2) et inférieure (T3)
- à la face inférieure et interne, les circonvolutions T3, T4 et T5. Cette dernière se termine au niveau de son extrémité antérieure en s'enroulant en haut et en arrière en forme de crochet qu'on appelle l'**uncus**.

3.2- FONCTIONS :

La région postérieure de la circonvolution temporale supérieure (T1) de l'hémisphère dominant comporte le centre du langage de Wernicke. Sa lésion entraîne un trouble qui porte sur la compréhension du langage, alors que l'expression est conservée, c'est l'aphasie de Wernicke (figure 8 et 9).

Plus en avant, il comporte également les aires de projection auditive sur T1 qui sont entourées d'aires d'association pour l'interprétation des sons. Sur la face interne, et plus précisément au niveau de l'uncus, il existe l'hippocampe et l'amygdale, deux structures qui ont un rôle important dans la mémorisation. Plus en dedans, sur l'uncus, se trouve également l'aire entorhinale qui représente une des aires olfactives qui reçoit et interprète le sens de l'odorat. Il faut savoir, par ailleurs, que le lobe temporal est très développé chez l'homme par rapport aux autres espèces. Il est le principal centre de l'intelligence.

4- LOBE OCCIPITAL

4.1- MORPHOLOGIE :

Il se termine en arrière par le pôle occipital. Il est séparé du lobe pariétal par les scissures perpendiculaires externe et interne et se continue avec le lobe temporal.

On y trouve 3 sillons sur sa face externe qui le subdivise en ses trois premières circonvolutions : O1, O2 et O3. Sa face infé-

rière et divisée par deux sillons (en commun avec la face inférieure du lobe temporal) : le sillon temporo-occipital latéral et le sillon temporo-occipital médial en 3 circonvolutions, de dehors en dedans : O3, O4 et O5. La face interne est divisée par la **scissure calcarine** en ses deux dernières circonvolutions : O5 et O6 (ou cuneus).

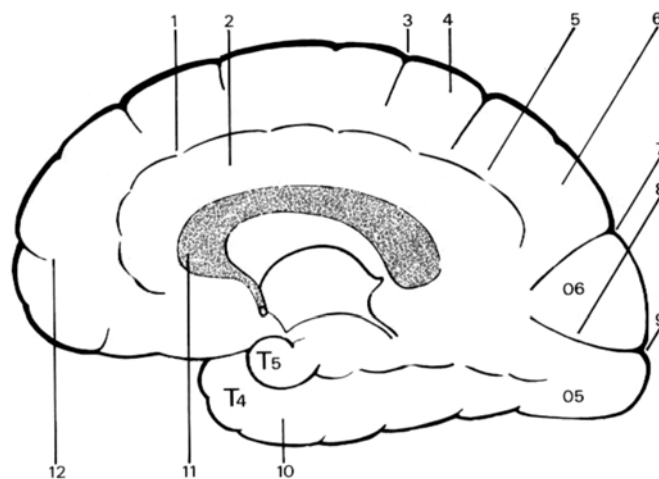
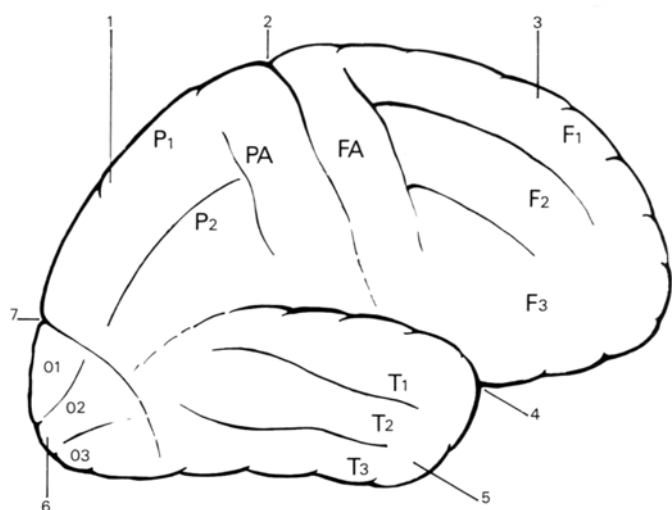
4.2- FONCTIONS :

Le lobe occipital est le centre de la vision. Il comporte l'aire de projection visuelle et autour de celle-ci les aires associatives (figures 8 et 9).

Figure 5 : face externe de l'hémisphère droit [2]

Figure 6 : face interne de l'hémisphère droit [2]

Figure 7 : face inférieure du cerveau [2].



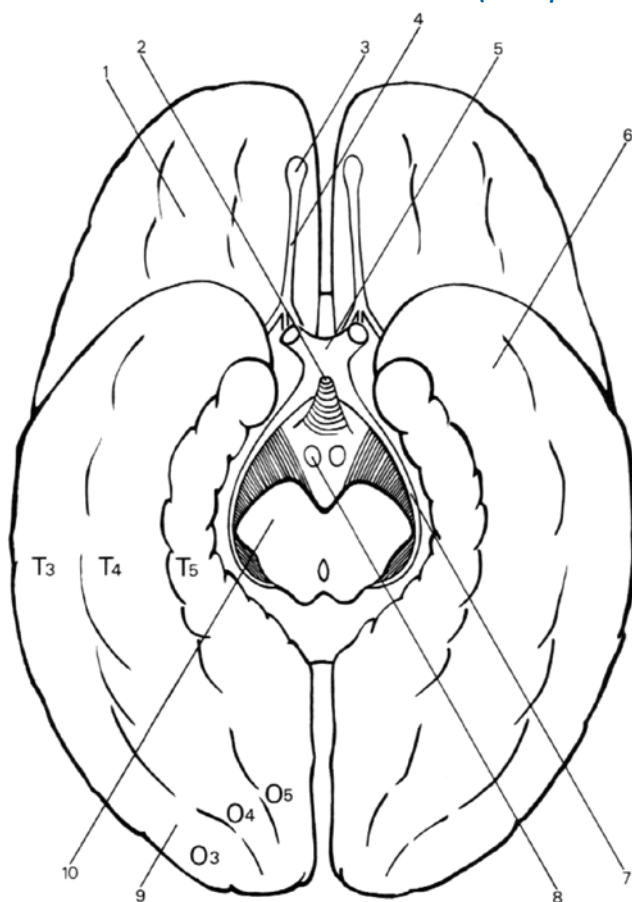
16. Face externe du cerveau.

1. Lobe pariétal. 2. Scissure de Rolando. 3. Lobe frontal. 4. Scissure de Sylvius. 5. Lobe temporal. 6. Lobe occipital. 7. Scissure perpendiculaire externe.

18. Face interne du cerveau.

1. Scissure callosomarginale. 2. Circonvolution du corps calleux. 3. Scissure de Rolando. 4. Lobule paracentral. 5. Lobe pariétal. 6. Lobule quadrilatère. 7. Scissure perpendiculaire interne. 8. Lobe occipital. 9. Scissure calcarine. 10. Lobe temporal. 11. Corps calleux. 12. Lobe frontal.

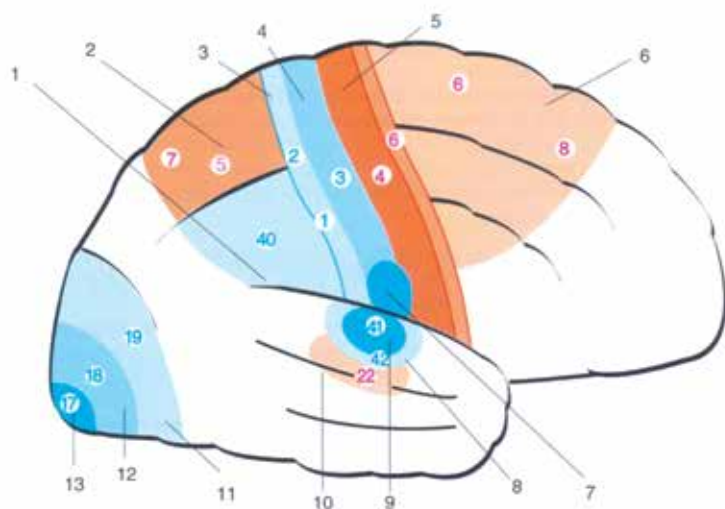
Figure 8 : Aires fonctionnelles du cortex cérébral (hémisphère droit) [2].



17. Face inférieure du cerveau.

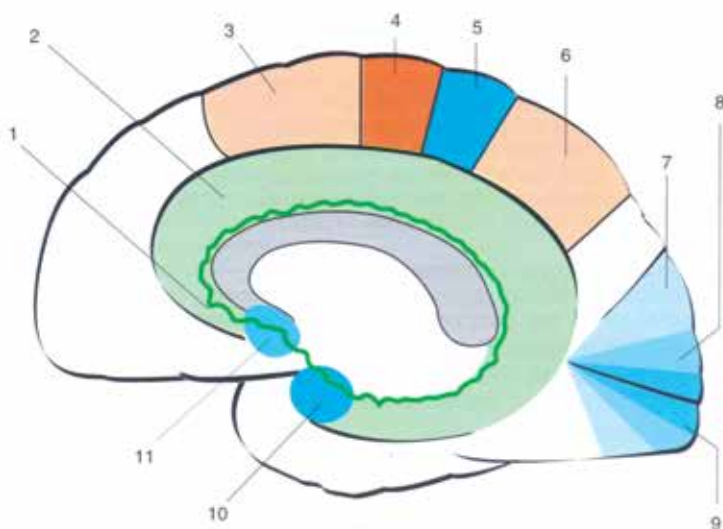
1. Lobe frontal. 2. Tige pituitaire. 3. Bulbe olfactif. 4. Bandelette olfactive. 5. Chiasma optique. 6. Lobe temporal. 7. Bandelette optique. 8. Tubercule mamillaire. 9. Lobe occipital. 10. Pédoncule cérébral.

Figure 9 : Principales aires fonctionnelles corticales (hémisphère gauche) [1].



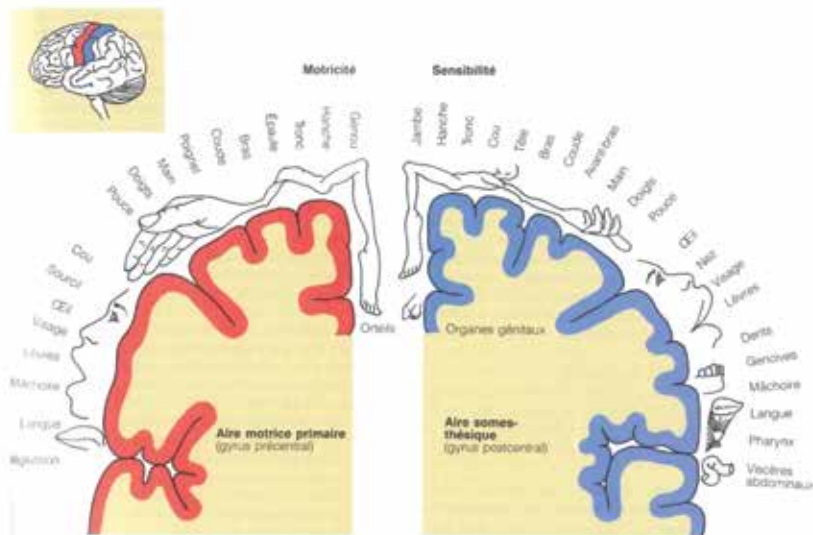
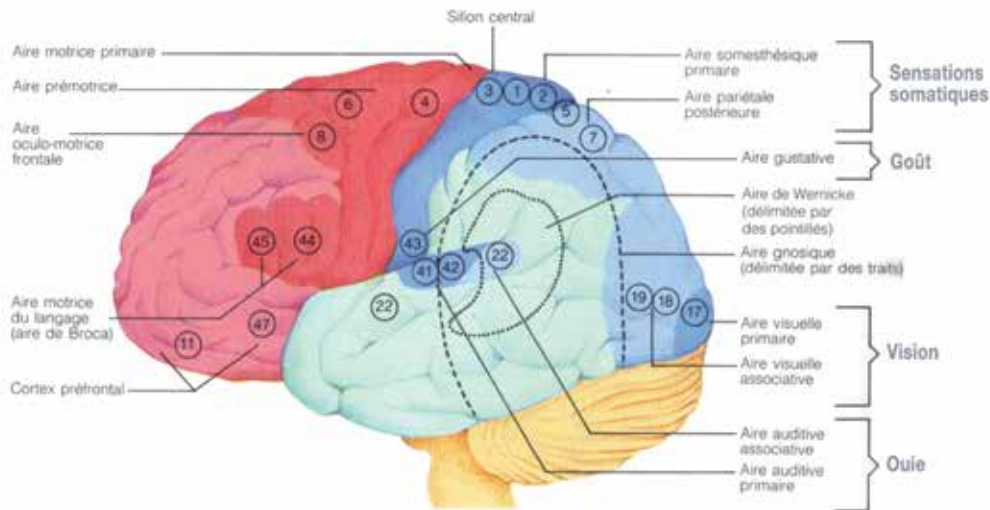
53. Aires corticales (vue externe).

1. Aire 40 (gnosie sensitive). 2. Aires 5 et 7 extra-pyramidales. 3. Aires 1 et 2 (gnosie sensitive). 4. Aire 3 (sensitive). 5. Aire 4 (motrice). 6. Aires 6 et 8 extra-pyramidales. 7. Aire gustative. 8. Aire 42 (gnosie auditive). 9. Aire 41 (auditive). 10. Aire 22 extra-pyramidale. 11. Aire 19 ou parastriée. 12. Aire 18 ou péristriée. 13. Aire 17 ou striée.



54. Aires corticales (vue interne).

1. Archicortex. 2. Paléocortex. 3. Aire extra-pyramidale. 4. Aire 4 motrice. 5. Aire 3 sensitive. 6. Aire extra-pyramidale. 7. Aire 19 ou parastriée. 8. Aire 18 ou péristriée. 9. Aire 17 ou striée. 10. Aire entorhinal. 11. Aire septale.



LE CERVEAU (II) SUBSTANCE GRISE PROFONDE

Le cerveau est formé de deux éléments principaux, le télencéphale et le diencephale. Le télencéphale correspond aux deux hémisphères cérébraux.

Le diencephale n'est pas visible, il correspond à la partie centrale et basale du cerveau.

Nous verrons dans ce cours la morphologie et les fonctions des principaux noyaux gris du diencephale et du télencéphale.

I-LE DIENCÉPHALE

Il correspond à la partie centrale du cerveau qui est hautement fonctionnelle et vitale. Il est composé d'une multitude de noyaux gris situés autour de la cavité du troisième ventricule et se regroupent en différentes régions : thalamique, hypothalamique et épithalamique. Nous décrivons, succinctement, le thalamus et l'hypothalamus.

1-LE THALAMUS :

1.1-MORPHOLOGIE

Sur une coupe frontale du cerveau, le thalamus se présente comme une masse plus ou moins circulaire.

Sur une coupe antéro-postérieure du cerveau, il a un aspect ovoïde long de 4 cm avec une extrémité antérieure pointue et une extrémité postérieure dilatée.

Les faces supérieures et internes du thalamus font partie des parois du troisième ventricule et du ventricule latéral homolatéral.

1.2-STRUCTURE

Le thalamus semble être une masse uniforme, mais en fait il est divisé par une lame de substance blanche en un grand nombre de noyaux. Cette lame enveloppe le thalamus et émet des prolongements qui s'y enfoncent et le divisent.

1.3-FONCTIONS

Les fonctions du thalamus sont nombreuses, chacune est assurée par des noyaux bien définis du thalamus :

1-Fonction sensitive :

Toutes les voies de la sensibilité convergent au thalamus et y font relais avant de se projeter vers le cortex pariétal.

2--Fonction sensorielle

Cette fonction est assurée par les corps genouillés qui sont rattachés au thalamus.

Le corps genouillé latéral est un relais pour les voies de la vision. Le corps genouillé médial est un relais pour les voies de l'audition.

3-Fonction motrice :

Le thalamus intervient à deux niveaux :

- Dans les voies cérébelleuses : en fonctionnant avec le cervelet, le cervelet agit sur le cortex par l'intermédiaire du thalamus.
- Dans la motricité automatique : en fonctionnant avec les corps striés (noyau caudé et noyau lenticulaire). Les fibres issues de ces noyaux font relais dans le thalamus avant de se projeter sur le cortex.

4-Fonction dans le comportement :

Le thalamus intervient également dans la vie émotionnelle, dans la mémoire et dans le caractère de l'individu.

2-L'HYPOTHALAMUS :

C'est une lame de substance grise située sous le thalamus.

Il est subdivisé en de nombreux noyaux.

Les fonctions de l'hypothalamus sont nombreuses, il faut retenir :

- des fonctions endocriniennes : il sécrète des hormones qui sont directement libérées par la post-hypophyse. Il contrôle également l'antéhypophyse par des substances qui passent par la tige pituitaire.
- des fonctions végétatives : l'hypothalamus est en effet le véritable cerveau végétatif. Les fonctions végétatives sont nombreuses : cardio-vasculaire (Tension artérielle, rythme cardiaque), des centres de la régulation de la soif de l'appétit, de la température....

II-LE TÉLÉNCÉPHALE

1-LES CORPS STRIÉS :

1.1-MORPHOLOGIE

Les corps striés sont deux volumineux noyaux situés dans chaque hémisphère, le noyau caudé et le noyau lenticulaire.

- **Le noyau caudé** a une forme en virgule qui s'enroule autour du thalamus avec : une tête volumineuse en avant, un corps mince et une queue effilée qui s'engage dans le lobe temporal. Sur toute sa longueur, le noyau caudé fait partie des parois des ventricules latéraux.

Le noyau caudé a une forme en virgule qui s'enroule autour du thalamus avec : une tête volumineuse en avant, un corps mince et une queue effilée qui s'engage dans le lobe temporal. Sur toute sa longueur, le noyau caudé fait partie des parois des ventricules latéraux.

- **Le noyau lenticulaire** a la forme d'une pyramide triangulaire à base externe, située latéralement par rapport au thalamus. Il débord le thalamus en avant et se rapproche de la tête du noyau caudé. Le noyau lenticulaire est divisé en deux zones : une zone périphérique (le putamen) et une zone centrale (le pallidum).

1.2-FONCTIONS

Les corps striés ont une division fonctionnelle différente de leur division morphologique, ils se divisent en striatum (noyau caudé + putamen) et en pallidum.

La plus connue des fonctions des corps striés est une fonction motrice voisine de celle du cervelet intéressant surtout les mouvements automatiques par l'intermédiaire du couple thalamo-strié. Ce couple intervient dans l'élaboration du mouvement.

2-L'AVANT-MUR OU CLAUSTRUM :

C'est une lame de substance grise située entre la capsule externe et la capsule extrême. Sa fonction n'est pas encore connue.

Figure15 : Principaux noyaux gris et leur disposition relative dans l'espace) [2].

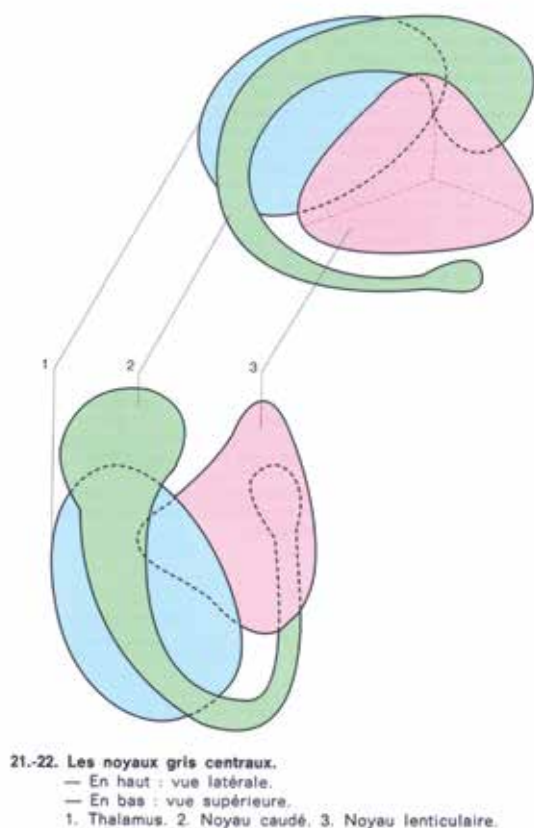


Figure 16 : Les noyaux gris centraux dans le cerveau : vus par transparence (a) et en coupe transversale (b) [1].

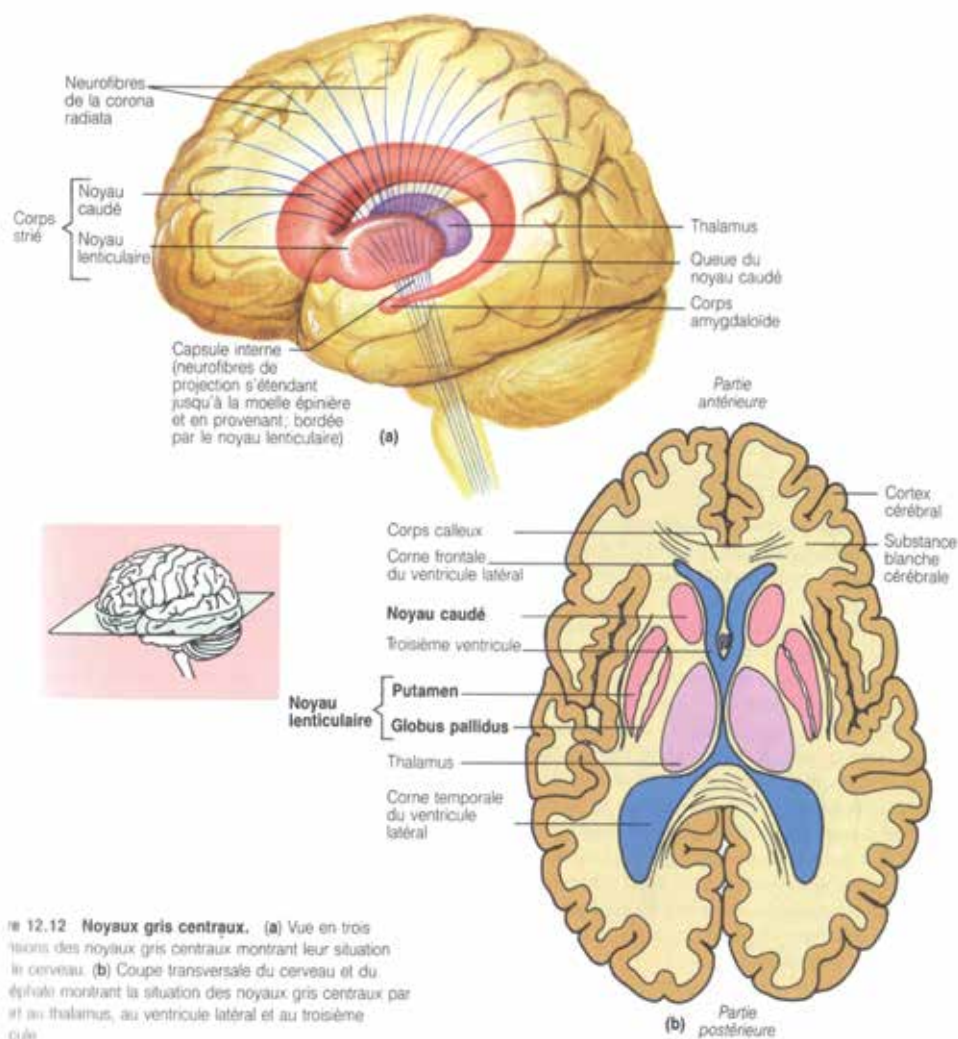
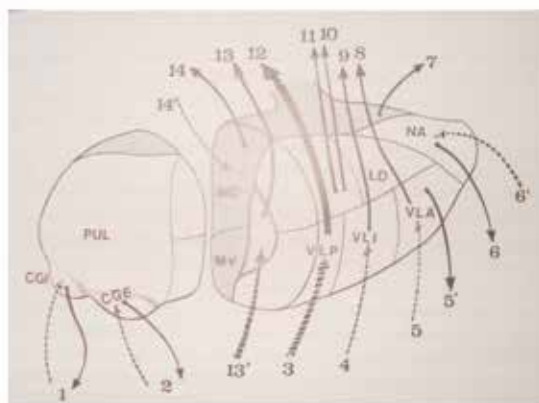
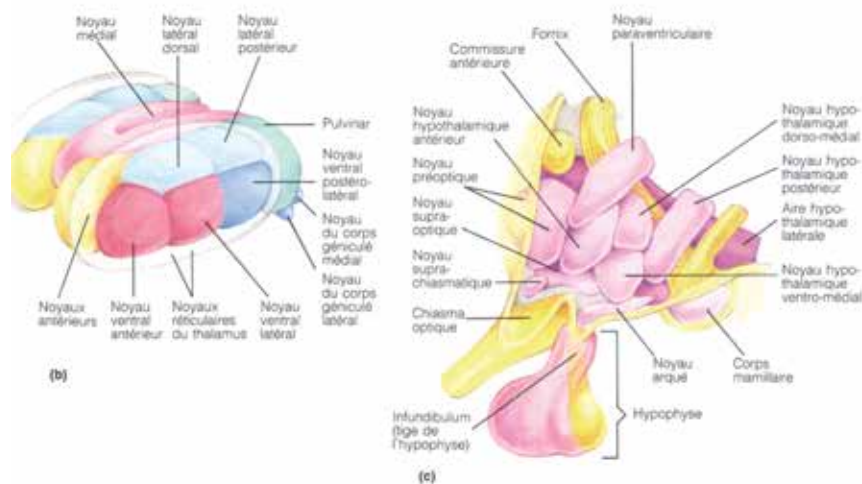


Figure 12.12 Noyaux gris centraux. (a) Vue en transparence des noyaux gris centraux montrant leur situation dans le cerveau. (b) Coupe transversale du cerveau et du tronc montrant la situation des noyaux gris centraux par rapport au thalamus, au ventricule latéral et au troisième ventricule.

Figure 17 : Le thalamus (a) et (b) et l'hypothalamus (c) [1].



(a) différent noyaux et connexions du thalamus (d'après A. Bouchet)



LE SYSTÈME VENTRICULAIRE

Les ventricules sont des cavités situées dans l'encéphale et qui contiennent du liquide céphalo-rachidien (LCR).

Tous les ventricules communiquent entre eux, permettant la circulation du LCR. Ils sont au nombre de quatre : les deux ventricules latéraux (VL), le troisième ventricule (V3) et le quatrième ventricule (V4).

I- DESCRIPTION

1- LES VENTRICULES LATÉRAUX :

Il existe deux ventricules latéraux; un dans chaque hémisphère. Il s'agit de cavités situées dans le télencéphale, elles s'étendent dans tous les lobes du cerveau. Une vue latérale de l'hémisphère supposé transparent nous permet de lui décrire plusieurs segments : une corne frontale, une corne temporale, une corne occipitale et entre ces trois cornes, il y a le carrefour ventriculaire. Ces ventricules latéraux communiquent au niveau de la partie postérieure de la corne frontale avec le troisième ventricule par les trous de Monro.

2- LE TROISIÈME VENTRICULE (V3) :

C'est une cavité située dans le diencephale. Il apparaît sur une vue supérieure comme une fente impaire située sur la ligne médiane. Il communique avec les ventricules latéraux par les trous de Monro et avec le V4 par l'aqueduc de Sylvius qui traverse le mésencéphale.

3- LE QUATRIÈME VENTRICULE (V4) :

Il est situé entre le cervelet et le tronc cérébral; il comporte un plancher qui est formé principalement par la face postérieure de la protubérance et du bulbe ouvert et un toit qui est formé principalement par le cervelet. Son, toit sous forme de tente, est perforé au niveau de sa moitié inférieure de trois trous qui permettent de le faire communiquer avec les espaces sous-arachnoïdiens; il s'agit des deux trous de Luschka qui sont latéraux et du trou de Magendie qui est médian et inférieur.

II- SÉCRÉTION ET CIRCULATION DU LCR

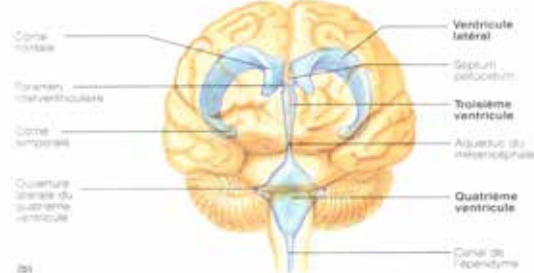
Les ventricules sont le lieu de sécrétion du LCR par les plexus choroïdes. Il existe deux plexus choroïdes le long du toit du V3 qui se continuent, à travers les trous de Monro, avec les plexus choroïdes des ventricules latéraux; un de chaque côté. Il existe également un plexus choroïde dans le V4.

Des ventricules latéraux, le LCR va circuler vers le troisième ventricule à travers les trous de Monro, puis le quitte par l'aqueduc de Sylvius vers le quatrième ventricule et enfin sort du système ventriculaire par les trous de **Luschka** et **Magendie** vers les espaces sous-arachnoïdiens où il va circuler autour du névraxe.

Figure 18 : le système ventriculaire vu par transparence,

de profil (a)

et de face (b) [1].



LA SUBSTANCE BLANCHE DU CERVEAU

Elle forme le centre des hémisphères cérébraux, et sépare les noyaux gris centraux de la substance grise corticale.

Les coupes de Charcot et de Flechsig mettent en évidence l'importance de cette substance qui contient la totalité des fibres afférentes ou efférentes du cortex groupées :

- soit de façon dispersée, entre les noyaux gris centraux et le cortex
- Soit de façon concentrée, entre les noyaux gris centraux
- Soit d'un hémisphère à l'autre : les commissures.

On distingue alors :

- les fibres de projection : associant le cortex cérébral et des structures sous-jacentes
- les fibres d'associations : associant des régions corticales différentes dans le même hémisphère
- les fibres commissurales associant les deux hémisphères cérébraux

I/ LA COURONNE RAYONNANTE :

Toutes les fibres de projection (efférentes et afférentes du cortex) forment la couronne rayonnante ou corona radiata, en position sous-corticale.

II/ LES CAPSULES :

Elles comprennent des fibres d'association et surtout des fibres de projection.

Elles sont au nombre de trois :

- capsule interne
- capsule externe
- capsule extrême

A-CAPSULE INTERNE :

Elle s'infiltré entre les noyaux gris centraux, entre :

- en dedans : le thalamus et le noyau caudé
- en dehors : le noyau lenticulaire

Sur une coupe frontale, la capsule interne apparaît comme une lame de substance blanche, épaisse de 5 à 10 mm se portant obliquement en haut et en dehors.

Sur une coupe sagittale se distinguent 4 portions, d'avant en arrière :

- bras antérieur
- genou
- bras postérieur
- segment rétrolenticulaire

B-CAPSULE EXTERNE :

- en dedans : le noyau lenticulaire
- en dehors : l'avant-mur (claustrum)

C-CAPSULE EXTRÊME :

- en dedans : l'avant-mur
- en dehors : le cortex de l'insula

III/ LES COMMISSURES :

Comprennent surtout des fibres hautes, interhémisphériques, et des fibres basses, diencephaliques, réunissant les noyaux gris centraux. Elles sont nécessaires à la coordination des deux hémisphères.

Elles comprennent :

- le corps calleux
- le trigone (fornix)
- la commissure blanche antérieure

A-LE CORPS CALLEUX

Lorsqu'on écarte les parties hautes des hémisphères, on aperçoit au fond de la scissure interhémisphérique la face supérieure du corps calleux.

Il a une forme de virgule à concavité inférieure. Il mesure 8 cm de longueur, 2 cm de largeur et 1 cm d'épaisseur. On lui décrit deux faces et deux extrémités :

- une face supérieure : convexe qui s'insinue dans la scissure interhémisphérique
- une face inférieure concave, en rapport avec le septum lucidum
- une extrémité antérieure incurvée en bas formant le genou dont la lame inférieure constitue le bec (rostrum)
- une extrémité postérieure également incurvée formant le bourrelet.

B-LE TRIGONE :

Sous-jacent au corps calleux, il a une forme triangulaire. Il est disposé en voûte que supportent 4 piliers. Il mesure 3 cm de longueur, 1 cm de largeur et 0.5 cm d'épaisseur. On lui décrit 2 faces et 4 piliers :

- Une face supérieure convexe, unie sur la ligne médiane au septum lucidum
- Une face inférieure concave en rapport avec la toile choroïdienne du 3^e ventricule
- Deux piliers antérieurs se terminant par les tubercules mamillaires
- Deux piliers postérieurs se terminant par les noyaux amygdaliens

C-LA COMMISSURE BLANCHE ANTÉRIEURE :

Croise transversalement la paroi antérieure du 3^e ventricule, et réunit les deux lobes temporaux en arrière du bec du corps calleux, ainsi que les régions olfactives et les bulbes olfactifs.

D-LA COMMISSURE BLANCHE POSTÉRIEURE :

Dans la paroi postérieure du 3^e ventricule et placée en avant de la glande épiphysaire.

IV/ LES FAISCEAUX D'ASSOCIATION :

Fibres arquées courtes ou fibres en U : associent des aires corticales adjacentes

Cingulum : faisceau d'association du lobe limbique ; substance blanche située dans la profondeur du gyrus cingulaire, s'étend de la région septale, en arrière du gyrus subcalleux jusqu'au gyrus parahippocampique

Faisceau longitudinal supérieur ou faisceau arqué : au-dessus et en dehors du putamen, en dehors de la capsule interne, associe lobe frontal, pariétal, occipital puis temporal

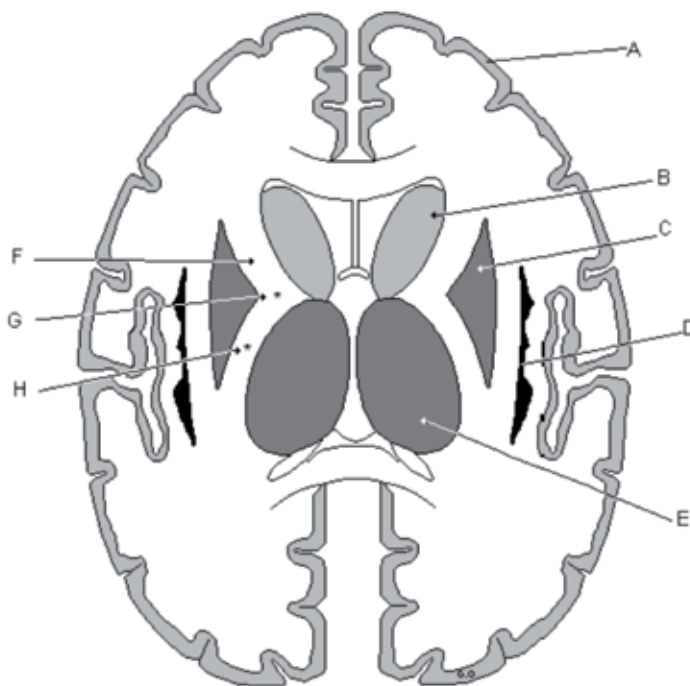
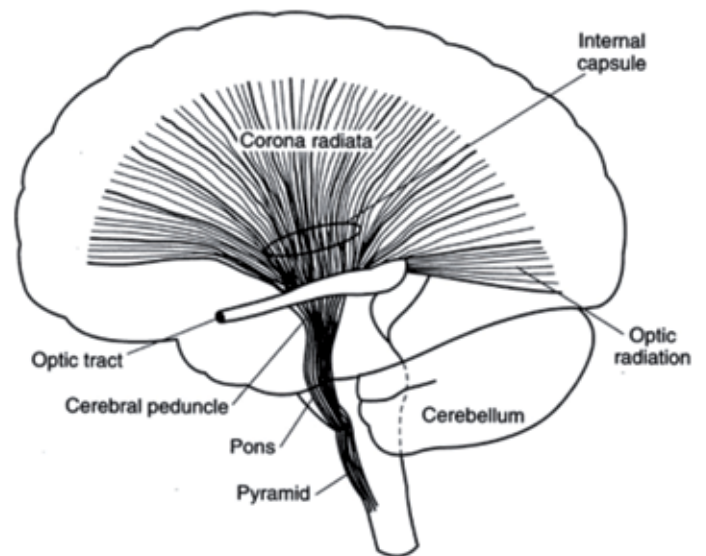
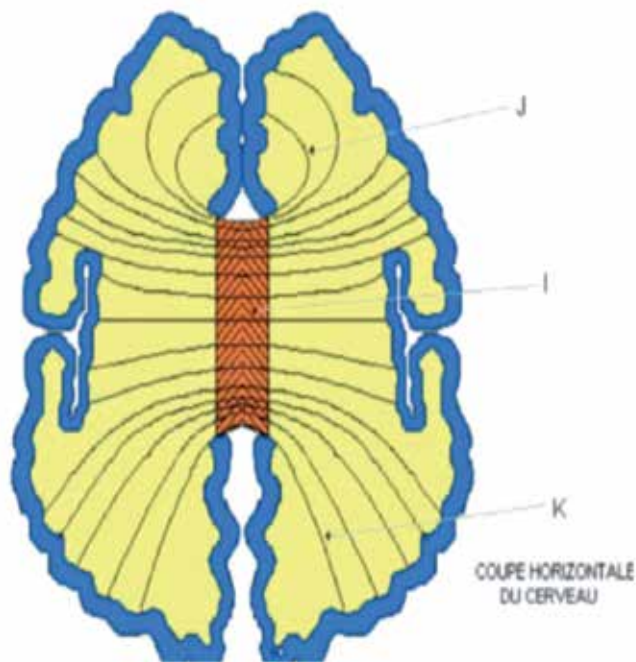
Faisceau longitudinal inférieur : dans la partie ventro-latérale du lobe temporal, réunit les lobes temporal et occipital

Faisceau sous calleux (fronto-occipital supérieur) : au-dessus et en dehors du noyau caudé en dedans de la capsule interne, réunit le lobe frontal aux lobes temporal et occipital

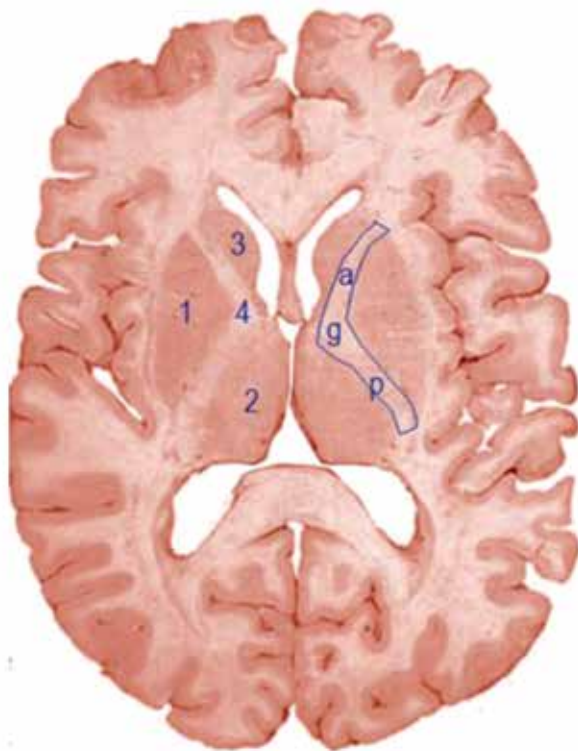
Faisceau fronto-occipital inférieur : dans la partie ventrale de la capsule extrême entre les régions latérales et ventro-latérales du lobe frontal et le lobe occipital

Faisceau unciné : composant du même système d'association avec le faisceau fronto-occipital inférieur. entre les lobes frontal (surtout région orbitaire) et le lobe temporal (uncus et pôle temporal).

Faisceau occipital vertical ou latéral (faisceau de Wernicke) : faisceau vertical dans la partie antérieure du lobe occipital et la partie postérieure des lobes pariétal et temporal réunit les lobes temporal et pariétal.



- A : Cortex
- B : Noyau caudé
- C : Noyau lenticulaire
- D : Clastrum
- E : Thalamus
- F : Capsule interne
- G : Genou de la capsule interne
- H : Bras postérieur de la capsule interne



Coupe horizontale (Fleischig)

- 1 : Noyau lenticulaire décomposable en :
 - Putamen (5) & Globus pallidum (6)
- 2 : Thalamus
- 3 : Noyau caudé :
- 4 : Capsule interne :
 - a : Bras antérieur
 - g : Genou
 - p : Bras postérieur

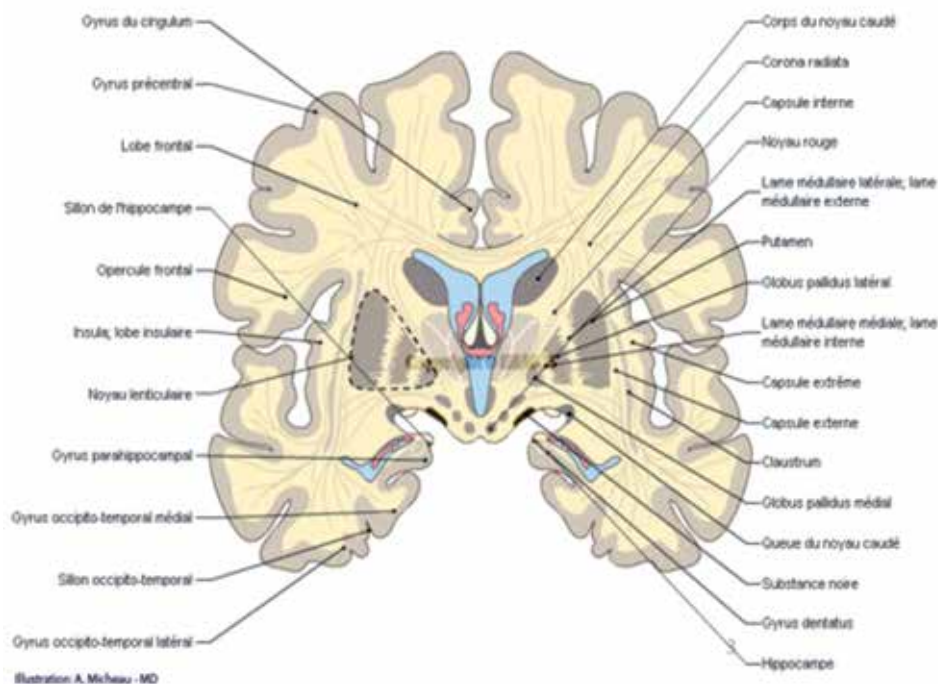
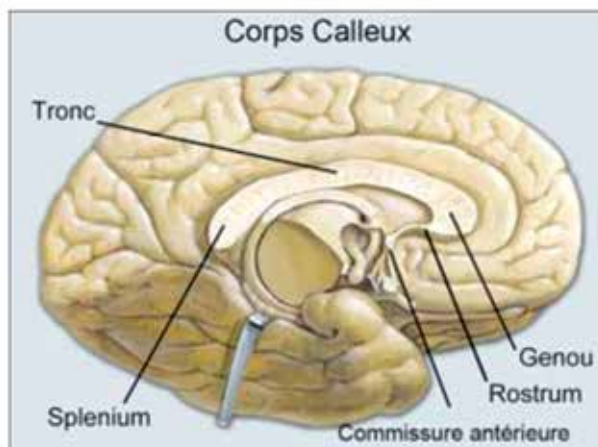
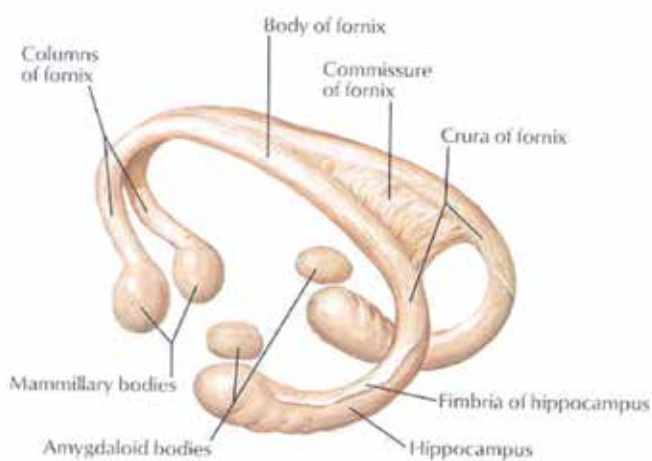
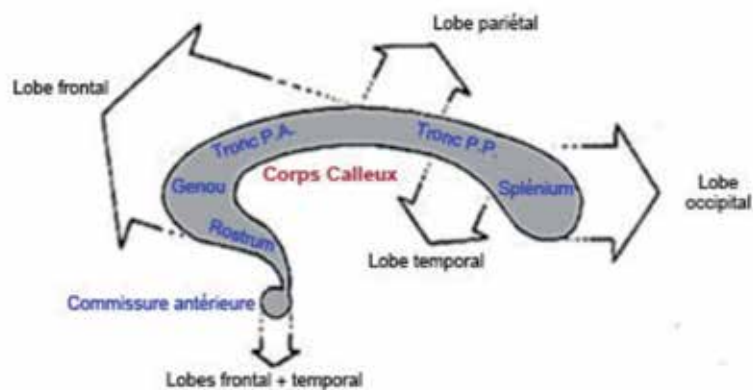
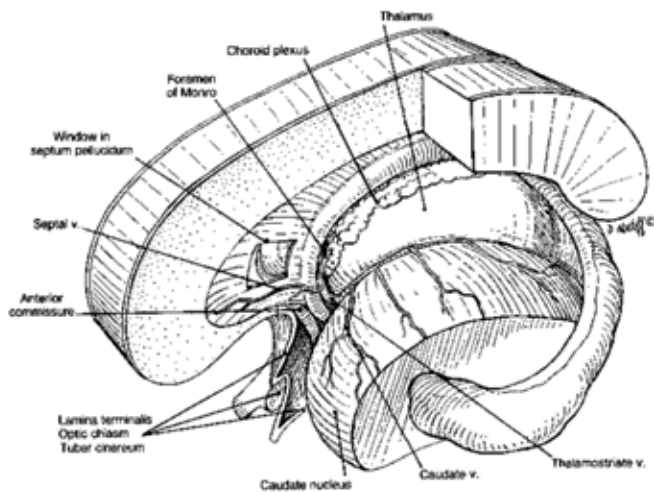
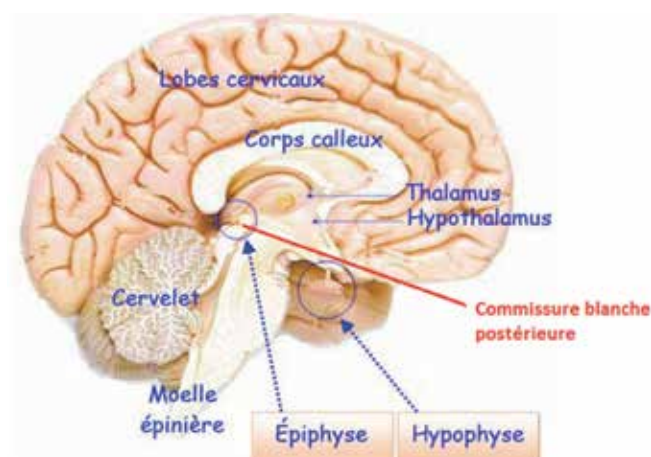
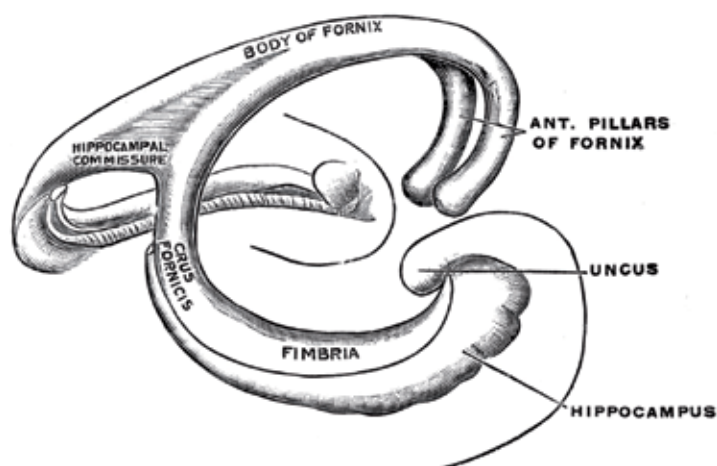
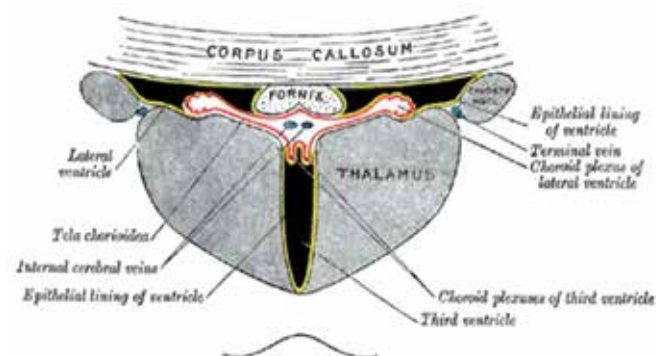


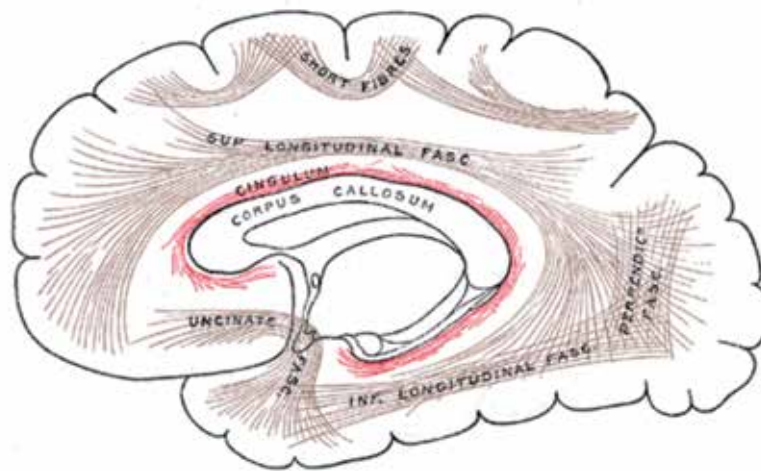
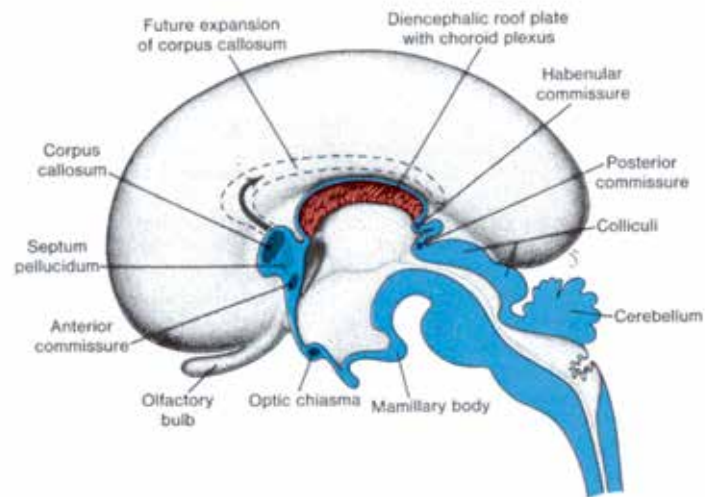
Illustration A. Michau - MD





Fornix: schema





Faisceaux d'associations

LES VOIES OPTIQUES

« La vision est assurée par deux appareils de cinématographie en couleur en synergie, les yeux, reliés au cortex cérébral par les voies optiques ».

Elles comprennent un appareil de perception ou rétine, des voies de conduction ou nerf optique, chiasma, tractus, et radiations optiques, et un appareil de perception, d'analyse et de reconnaissance ou cortex occipital.

I/ DISPOSITION GÉNÉRALE DES VOIES OPTIQUES

A-LA RÉTINE :

Elle constitue l'appareil de perception, est dominée par trois faits essentiels, optiques, histologiques et physiologiques.

• UN FAIT OPTIQUE :

tout objet de l'espace est projeté tête-bêche sur la rétine : une image placée au-dessus de la ligne de fixation perçue par la rétine inférieure, une image située à droite par la rétine située à gauche. Ainsi, pour chaque œil, l'espace droit sera-t-il projeté sur l'hémirétine gauche, et inversement.

• UN FAIT HISTOLOGIQUE :

La rétine périphérique est tapissée de bâtonnets qui ne perçoivent que des stimuli noirs ou blancs, et du fait de leur faible densité, réclament de fortes stimulations. Au contraire, la rétine centrale ou macula est tapissée de cônes qui supportent la vision colorée et leur très forte densité fait qu'une stimulation minime suffit à les exciter.

Ces notions expliquent la distinction physiologique fondamentale entre la macula, support de la vision colorée et de l'acuité visuelle, et le reste de la rétine qui ne permet qu'une perception grossière, mais est pourtant essentielle pour se situer dans l'espace et diriger son regard.

• UN FAIT PHYSIOLOGIQUE :

L'image de l'espace est perçue par les deux yeux à la fois, mais les deux stimuli rétinien ont une projection occipitale unique. Ces points rétinien, placés de façon similaire et de même projection corticale sont appelés « correspondants ». En cas de paralysie oculomotrice, l'impossibilité de maintenir le parallélisme des yeux et donc d'aligner les points correspondants entraîne la superposition de deux images différentes au niveau du cortex et donc une diplopie.

B- LES NERFS OPTIQUES

C- LE CHIASMA OPTIQUE

D- LE TRACTUS OPTIQUE

À partir du chiasma, les voies optiques sont représentées par les tractus optiques qui cheminent à la face médiale des lobes temporaux, formant le toit de la fissure transverse (fente de Bichat) vascularisés dans leur moitié antérieure par les artères choroïdiennes antérieures et donc lésées dans les thromboses proximales de l'artère cérébrale moyenne.

E- LES RADIATIONS OPTIQUES

Après relais dans le corps genouillé latéral, les voies optiques, par leur troisième neurone, forment les radiations optiques qui s'enfoncent dans la profondeur du lobe pariétal, enjambent, de dedans en dehors, la partie postérieure de la corne inférieure du ventricule latéral, puis cheminent le long de la corne postérieure, avant d'aller se projeter sur le lobe occipital, autour du sillon calcarin. Dans ce trajet, les radiations optiques s'étalent, formant un ruban sagittal. La moitié supérieure de ce ruban représente la moitié supérieure de la rétine, la moitié inférieure représente la moitié inférieure de la rétine et la partie moyenne représente la macula.

II/ LES VOIES SENSORIELLES

A- Les cellules sensorielles réceptrices sont les cellules en cônes et en bâtonnets qui constituent la couche la plus profonde de la rétine.

B- Le protoneurone : est compris tout entier dans l'épaisseur de la rétine. C'est un neurone bipolaire. Ses dendrites sont en relation avec les cellules sensorielles. Les axones de ce protoneurone se mettent en relation avec :

Ce poly a été téléchargé depuis <http://med-tmss.blogspot.com/2016/08/cours.html>

- C- Le deuxième neurone (**deutoneurone**) ou cellule multipolaire dont les dendrites et le corps cellulaire sont inclus dans l'épaisseur de la rétine. Par contre son axone, beaucoup plus long, s'engage dans le nerf optique au niveau d'une zone appelée papille. Il parcourt toute la longueur du nerf optique, puis passe dans le chiasma, puis dans la bandelette optique ou tractus optique, et se termine dans le corps genouillé externe.
- D- Le troisième neurone a ses dendrites et son corps cellulaire dans le corps genouillé externe. Son axone constitue les radiations optiques qui l'amènent au cortex occipital où il se termine (aire 17 de Brodman). Les aires **visuopsychiques** (Aire 18) et **visuognosiques** (aire 19) permettent la reconnaissance du stimulus.

III/ SOMATOTOPIE DES VOIES OPTIQUES

La nécessité de la vision binoculaire implique une répartition très particulière des différentes fibres nerveuses le long de ces voies optiques.

L'appareil optique, muni du cristallin (lentille biconvexe) est conçu de telle façon que l'image imprimée sur la rétine est renversée :

- le champ visuel supérieur est reçu par les parties inférieures de la rétine (hemichamp rétinien inférieur) et inversement ;
- de même, le champ visuel externe ou temporal est perçu par les parties internes ou nasales) de la rétine, et inversement.

Les fibres qui partent de la rétine temporale ou externe suivent le côté externe du nerf optique, puis la partie externe du chiasma, et enfin la bandelette optique du même côté. Au contraire, les fibres qui partent de la rétine nasale ou interne, suivent le côté interne du nerf optique, puis croisent la ligne médiane, dans le chiasma pour aller suivre la bandelette optique du côté opposé. En outre, il existe sur la partie de la rétine strictement centrale, correspondant à l'axe horizontal du globe oculaire, une petite zone qui est adaptée à la vision la plus nette : c'est la macula. Les fibres qui en partent dites fibres maculaires, se divisent en deux portions au niveau du chiasma ; les unes restent homolatérales, les autres s'engagent dans la bandelette optique opposée et sont donc controlatérales.

Dans les radiations optiques, qui s'étalent, formant un ruban sagittal, la partie supérieure est constituée par la moitié supérieure de l'hémichamp temporal ou quadrant supérieur de la rétine et la partie inférieure par le quadrant inférieur de la rétine. La partie moyenne représente la macula.

IV/ CONSÉQUENCES CLINIQUES

Cette disposition rend compte des troubles qu'entraîne une interruption en différents points des voies optiques.

- a- Une interruption sur le nerf optique donne une cécité monoculaire du même côté ;
Toute lésion d'un nerf optique dans l'orbite, le canal sphénoïdal ou dans l'étage moyen donnera donc une symptomatologie exclusivement unilatérale. Les lésions inflammatoires toucheront préférentiellement le faisceau maculaire, le plus fragile. Les lésions compressives ou traumatiques, suivant leur localisation, entraîneront les déficits variables, du champ visuel temporal par exemple si la lésion est nasale, du champ visuel supérieur si elle est inférieure...
- b- Une interruption dans le chiasma entraîne une disparition du champ visuel temporal des deux yeux (puisque interrompant les fibres issues de la rétine nasale de chaque œil). C'est une hémianopsie bitemporale.
La lésion pure du chiasma ne concerne que les faisceaux croisant donc les deux faisceaux nasaux. La perte visuelle intéresse donc les deux champs visuels temporaux. C'est l'hémianopsie bitemporale, témoin d'une lésion chiasmatique (tumeur de l'hypophyse en général).
- c- Une interruption de la bandelette optique et au-delà entraîne une disparition du champ visuel temporal du côté opposé à la lésion parce qu'elle interrompt les fibres rétinienne temporales de l'œil opposé à la lésion et les fibres rétinienne nasales de l'œil homolatéral à la lésion ; ces fibres croisent dans le chiasma optique.
- d- L'atteinte du faisceau supérieur des radiations optiques donne une quadransie latérale homonyme inférieure, l'inverse est réalisé par l'atteinte du faisceau inférieur.

V/ LES AIRES VISUELLES

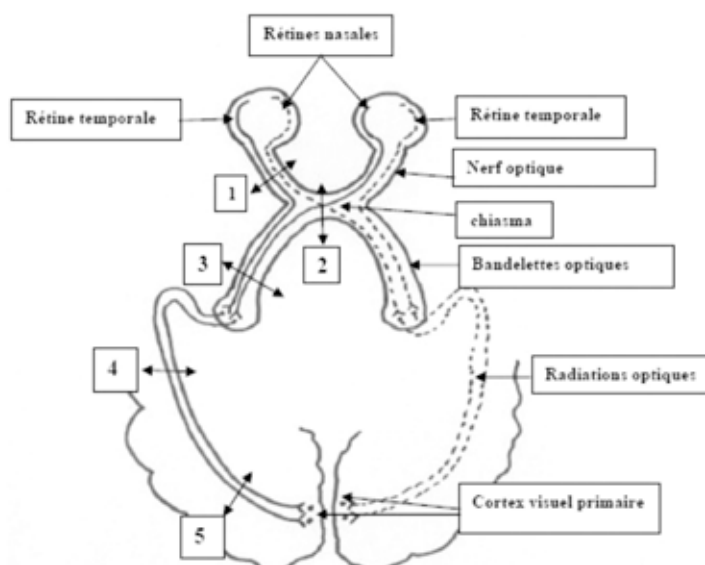
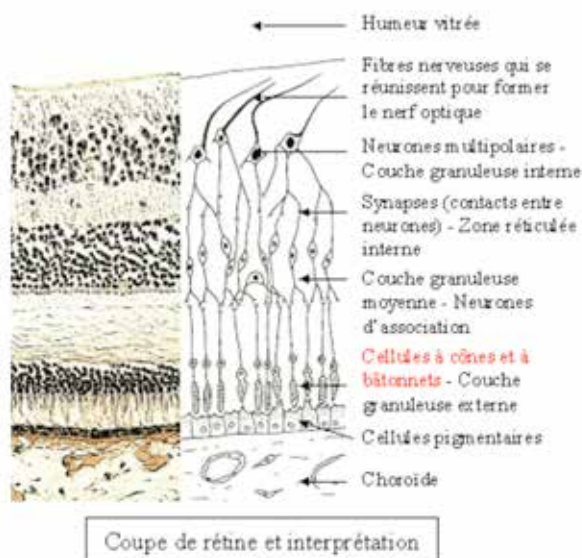
Au lobe occipital, les aires visuelles sont centrées par le sillon calcarin.

- A- L'aire visuosensorielle de réception simple : ou aire 17 occupe les lèvres du sillon. La rétine supérieure se projette sur la lèvre supérieure du sillon et la rétine inférieure sur sa lèvre inférieure alors que la macula se projette à son extrémité postérieure sur le pôle occipital. Les lèvres du sillon calcarin constituent ce que l'on appelle la rétine corticale.
La lésion unilatérale de l'aire 17 donne une hémianopsie latérale homonyme et la lésion bilatérale une cécité corticale.
- B- L'aire visuopsychique (aire 18) et l'aire visuognosique (Aire 19) de perception et de reconnaissance entourant l'aire visuosensorielle au niveau du lobe occipital de l'hémisphère majeur essentiellement.
La destruction de ces aires entraîne l'agnosie visuelle et au plan du langage l'alexie agnosique anciennement dite cécité verbale.

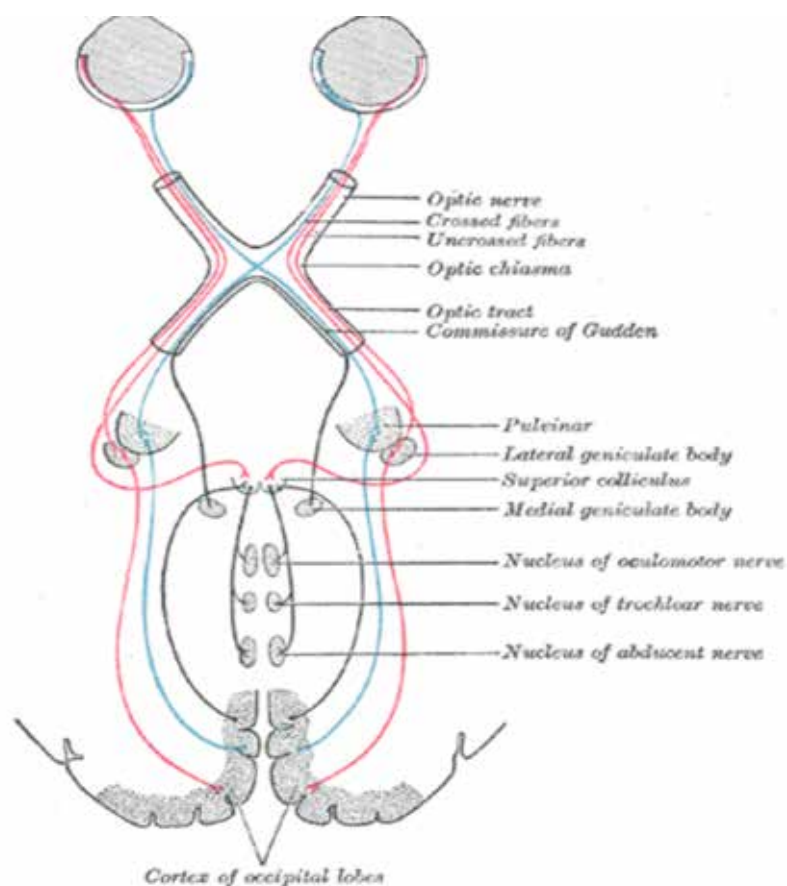
VI/ LE RÉFLEXE PHOTOMOTEUR ET L'ACCOMMODATION À LA LUMIÈRE

Des fibres rétiniennes spéciales ou fibres de Dimmer conduisent les sensations lumineuses à travers le corps géniculé latéral au colliculus supérieur. De la, part une voie vers le centre iridoconstricteur, noyau accessoire du nerf oculomoteur dont les fibres, par le III, gagnent le ganglion ciliaire (gg. Ophtalmique) d'où naissent les nerfs ciliaires. D'autres fibres gagnent le centre iridodilatateur (noyau de Budge). Centre orthosympathique médullaire (C8-T2) dont les fibres gagnent le ganglion stellaire puis la chaîne cervicale sympathique, ensuite le plexus carotidien. Celui-ci s'anastomose avec le nerf ophtalmique qui conduit ainsi les fibres iridodilatatrices à travers le ganglion ciliaire.

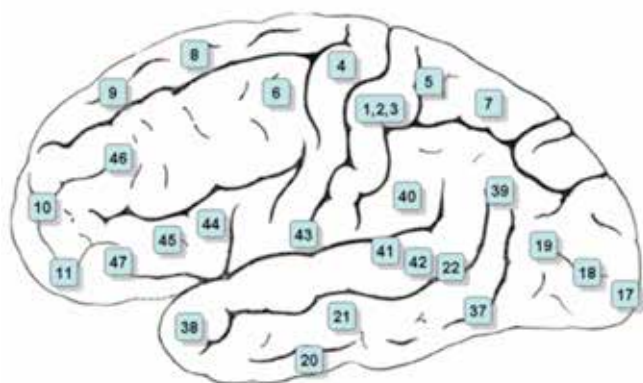
Les fibres de Dimmer sont comme les fibres sensorielles, directes et croisées. Ceci explique le réflexe consensuel et dans le cas de section d'un nerf optique, le réflexe à la lumière persiste dans les deux yeux, cela explique aussi le réflexe. Cela explique aussi le réflexe hémipopique de Wernicke et dans le cas de section du tractus optique, le réflexe existe seulement pour l'excitation lumineuse des quadrants rétiniens correspondants au tractus intact.



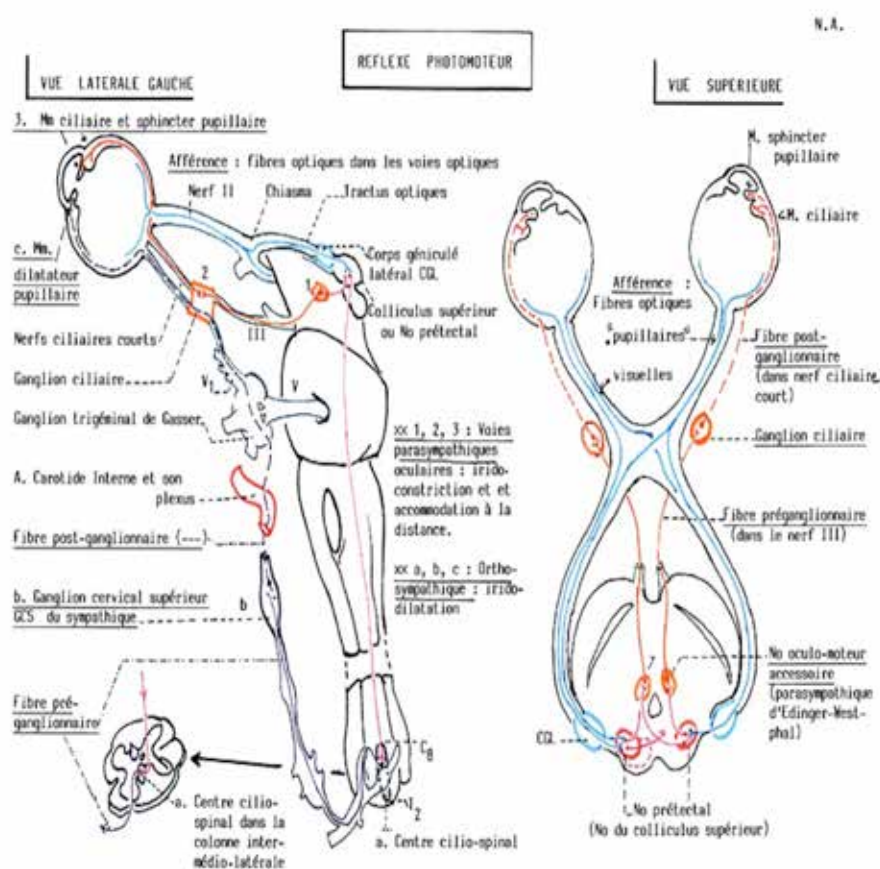
Les voies visuelles



Aires Visuelles (17, 18 et 19 de Brodmann)



Le réflexe photomoteur



Le reflexe photomoteur

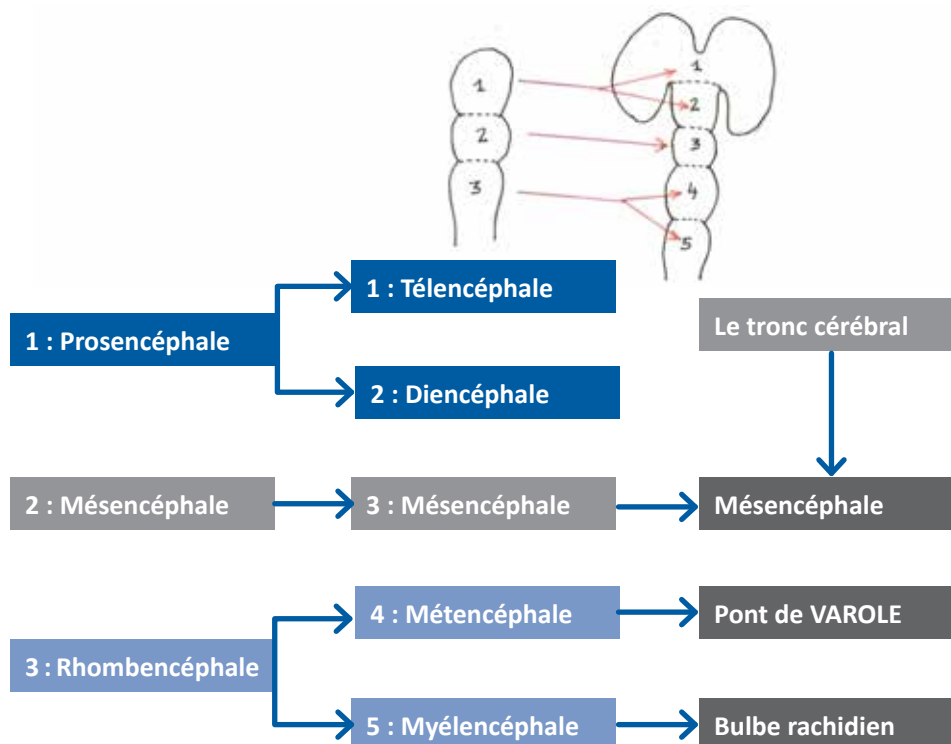
LE TRONC CÉRÉBRAL

I- RAPPEL D'EMBRYOLOGIE

Au cours de l'embryogenèse, la partie craniale du tube neural va donner le futur encéphale. Cette partie craniale, d'abord segmentée en trois (prosencephale, mésencéphale et rhombencéphale), puis en cinq vésicules (le prosencephale se divisant en télencéphale et en diencéphale, le rhombencéphale en métencéphale et en myélencéphale).

Le tronc cérébral dérive de l'évolution des **trois vésicules postérieures** de l'encéphale, donc il sera formé de trois segments qui sont de haut en bas :

- **Le mésencéphale**, qui garde son appellation embryologique
- **Le pont de VAROLE** ou **protubérance annulaire** qui dérive du métencéphale
- **La moelle allongée** ou le **bulbe rachidien** qui dérive du myélencéphale



II- MORPHOLOGIE EXTERNE DU TRONC CÉRÉBRAL

1- SIÈGE

Tapis dans la **fosse crânienne postérieure**, le tronc cérébral et le cervelet forment à première vue une masse unique dont il faut séparer les éléments pour les étudier l'un après l'autre. Ce faisant, on doit couper leurs moyens d'union, les **péduncules cérébelleux**, qui apparaîtront donc sectionnés sur les vues isolées.

La fosse crânienne postérieure tapissée de dure mère est limitée :

En arrière : par l'écaille de l'os occipital

En avant : le clivus

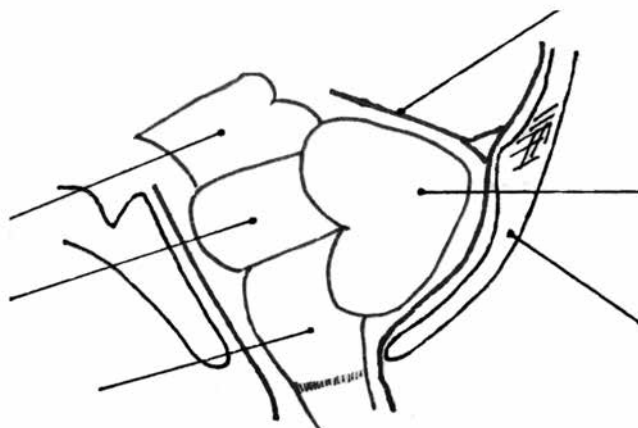
Latéralement : la partie latérale de l'os occipital et la face endocrânienne postérieure de la partie pétreuse de l'os temporal,

En bas : le trou occipital ou le foramen magnum

En haut : la tente du cervelet, cloison incomplète de dure mère, ménageant en avant et sur la ligne médiane, un orifice ovalaire livrant passage au mésencéphale ; l'incisure de la tente ou foramen ovale

Dans la fosse crânienne postérieure nous avons le cervelet en arrière et le tronc cérébral en avant avec ces trois segments qui sont de haut en bas **Le mésencéphale**, **Le pont de VAROLE** et **La moelle allongée**.

Le tronc cérébral déborde les limites réelles de la fosse crânienne postérieure, en effet il arrive en bas jusqu'au bord supérieur de l'arc antérieur de C1, et en haut, il est limité par une ligne imaginaire qui relie les corps mamillaires en avant à la commissure blanche postérieure.



2- FACE ANTÉRIEURE DU TRONC CÉRÉBRAL

A- LE BULBE RACHIDIEN OU MOELLE ALLONGÉE

Le bulbe rachidien représente la partie intermédiaire du névraxe entre la moelle épinière et le pont, il est limité :

En bas : par une zone légèrement rétrécie qu'on appelle le **Colet du bulbe**

En haut : par le **sillon bulbo pontin**

- Du **sillon bulbo pontin** vont émerger les **nerfs crâniens** suivants :
 - **Le nerf abducens ou moteur oculaire externe (VI)**, qui commande le muscle droit externe de l'œil et dont l'atteinte se traduit par une paralysie de l'abduction de l'œil homolatéral avec un strabisme convergent
 - **Le nerf facial (VII)**, qui commande les muscles de la face et dont l'atteinte entraîne une paralysie faciale périphérique.
 - **Le nerf intermédiaire de Wrisberg (VII bis)**, qui contient des fibres végétatives motrices parasympathiques pour les glandes et muqueuses du palais, du pharynx et du nez, pour les glandes maxillaire, sublinguale et lacrymale. et des fibres de la sensation du goût des 2/3 antérieures de la langue.
 - **Le nerf cochléo vestibulaire ou stato-acoustique (VIII)** dont les fibres proviennent des organes récepteurs de l'équilibre et de l'audition.
- Cette face antérieure du bulbe présente à décrire :
 - La **fissure médiane ventrale**, elle est presque comblée à son 1/3 inférieure du fait de la **décussation pyramidale** qui se fait à ce niveau.
 - Le **sillon ventro-latéral** qui va séparer le **cordon ventral** du **cordon latéral**.
 - Le **cordon ventral** est épaissi longitudinalement vers le haut et forme la **pyramide bulbaire** ou passe le tractus cortico-spinal. Au-dessus de la pyramide bulbaire, en regard du sillon bulbo-pontin, émerge le VI.
 - Le **cordon latéral** prolonge celui de la moelle, épinière, il est occupé en haut et en avant par une saillie, **l'olive bulbaire**, en avant de laquelle ce segment du **sillon ventro-latéral** prendra désormais le nom du sillon préolivaire et par où vont émerger les filets du **nerf hypoglosse XII**. Le **nerf hypoglosse** commande les muscles de la langue et assure la motricité linguale.
 - En arrière de l'olive, c'est **l'aire rétro olivaire** et en haut l'olive est séparée du sillon bulbo-pontin par la **fossette sus olivaire** ou la **fossette latérale du bulbe**. En regard de cette fossette latérale du bulbe et à partir du sillon bulbo-pontin vont émerger comme on l'a déjà cité de dedans en dehors les **nerfs VII, VII bis et le VIII**.
- En arrière du cordon latéral, on a l'émergence des nerfs mixtes à partir d'un faux sillon c'est le **sillon des nerfs mixtes** ou **sillon dorso-latéral** qui correspond en fait à la ligne d'émergence de ces nerfs qui sont de haut en bas :
 - **Le nerf glosso-pharyngien IX**, c'est un nerf mixte, moteur pour les muscles du larynx et du pharynx et végétatif moteur parasympathique pour la glande parotide. Il permet la sensation du goût du 1/3 postérieure de la langue et la sensibilité du pharynx, du larynx et du conduit auditif.

- **Le nerf vague X**, c'est un nerf mixte également contenant des fibres motrices pour le pharynx et le larynx, des fibres végétatives motrices parasympathiques et végétatives sensibles pour les organes du thorax et de l'abdomen ainsi que des fibres sensibles pour le conduit auditif externe.
- **Le nerf accessoire XI** contient une branche bulbaire et une branche spinale remontant par le trou occipital et formée par les radicelles spinales. Le nerf XI va se diviser après l'union de ces deux racines en deux branches : une branche bulbaire destinée aux muscles intrinsèques du larynx, et en une branche spinale, destinée au muscle sterno-cléido-mastoïdien et au trapèze.

B- LE PONT DE VAROLE OU PROTUBÉRANCE ANNULAIRE

Ce segment du tronc cérébral est allongé transversalement d'un hémisphère cérébelleux à l'autre. Il présente à décrire sur cette face ventrale :

- Une gouttière ou un sillon, la **gouttière basilaire**, c'est un gros sillon longitudinal médian dont lequel repose un gros vaisseau : le **tronc basilaire** ou l'**artère basilaire** union des deux artères vertébrales
- De chaque côté du sillon basilaire, nous avons les bourrelets ou éminences pyramidales qui sont parcourus par des sillons transversaux arciformes et qui rejoignent en arrière les pédoncules cérébelleux moyens
- À l'union de cette face antérieure et de la face latérale, à l'union du 1/3 supérieure et du 1/3 moyen du pont nous avons une petite fossette correspondant à l'origine apparente du **nerf trijumeau V**, cette appellation du V en trijumeau est due au fait que ce nerf va se terminer en trois branches périphériques qui sont le **V1** ou nerf ophtalmique, le **V2** ou **nerf maxillaire supérieur** et le **V3** ou **nerf maxillaire inférieur** ou encore **nerf mandibulaire**. Le nerf trijumeau est un nerf mixte, mais essentiellement sensitif qui assure la sensibilité de l'hémiface et moteur pour les muscles masticateurs. L'origine apparente du nerf V est formée donc de **deux racines**, une racine sensitive la plus volumineuse et une deuxième racine motrice plus grêle.

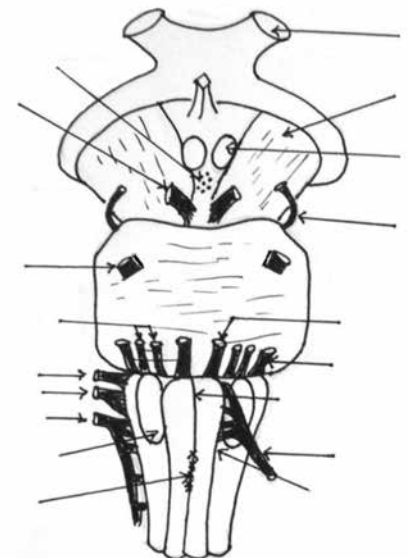
C- LE MÉSENCÉPHALE

Sur cette face ventrale, le mésencéphale présente à décrire :

- Le sillon **ponto-mésencéphalique** qui sépare en bas le pont des **pédoncules cérébraux** en haut avec de chaque côté nous avons un **pédoncule cérébral**.
- Les pédoncules cérébraux sont deux cordons blancs, saillants obliques en haut, en avant et en dehors.
- Chaque pédoncule cérébral présente près de son bord médial une fossette longitudinale c'est le **sillon de l'oculomoteur** par où s'échappent les radicelles du **nerf oculomoteur** ou **nerf moteur oculaire commun III**. Le III contient des fibres motrices pour les muscles droit interne, droit supérieur, droit inférieur, petit oblique et au releveur de la paupière supérieure; d'où son atteinte entraîne une paralysie de tous ces muscles de l'œil avec un strabisme divergent et un ptosis. Le III contient aussi des fibres motrices parasympathiques pour l'iris (constricteur de la pupille) et dont l'atteinte entraîne une mydriase.
- Dans l'écartement des deux pédoncules cérébraux c'est-à-dire dans cet espace inter pédonculaire apparaît la face inférieure du diencephale avec d'avant en arrière :
 - L'espace perforé postérieur
 - Les deux tubercules mamillaires
 - L'infundibulum avec la tige hypophysaire
- Les bandelettes optiques limitent en haut le mésencéphale, ces bandelettes optiques vont reliées le chiasma optique aux corps géniculés latéraux ou corps genouillés externes.

Donc sur cette face antérieure du tronc cérébral on doit retenir **l'émergence des dix deniers nerfs crâniens** (sauf le IV) qui sont de nouveau :

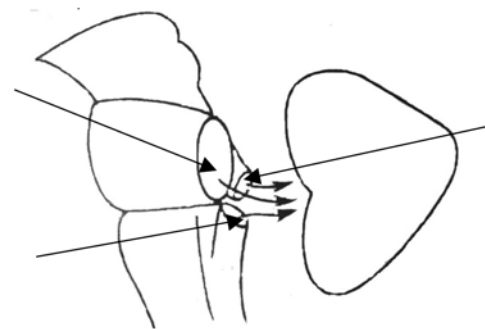
- III (nerf oculomoteur ou nerf moteur oculaire commun) sort du pédoncule cérébral, par le sillon de l'oculomoteur
- V (nerf trijumeau) émerge de la face antérolatérale du pont par deux racines :
 - La racine sensitive ou portion majeure, la plus grosse.
 - La racine motrice ou portion mineure, la plus grêle.
- VI (nerf abducens ou nerf moteur oculaire externe) sort de la partie médiale du sillon bulbo-pontin, juste en dehors du troc basilaire.
- VII (nerf faciale), le VII bis (nerf intermédiaire de Wrisberg) et le VIII (nerf stato-acoustique ou cochléo-vestibulaire) ; tous les trois sortent successivement de dedans en dehors du sillon bulbo pontin en regard de la fossette sus olivaire.
- Le IX (nerf glosso-pharyngien), le X (le nerf vague ou pneumogastrique) et la partie vagale ou racines craniales du nerf accessoire XIc, regroupés sous la dénomination de « nerfs mixtes » émergents dans cet ordre du sillon dorso-latéral du bulbe.
- XII (nerf hypoglosse) émerge du sillon ventro-latéral (plus précisément du segment pré olivaire) du bulbe.



Le IV ou **nerf trochléaire** ou **pathétique**, est un nerf moteur pour le muscle grand oblique de l'œil, il est le seul nerf crânien à émerger de la face postérieure du tronc cérébral, plus précisément comme on le verra par la suite du tectum mésencéphalique, juste de part et d'autre de la ligne médiane, un peu plus caudalement des collicules inférieures.

3- FACE POSTÉRIEURE DU TRONC CÉRÉBRAL

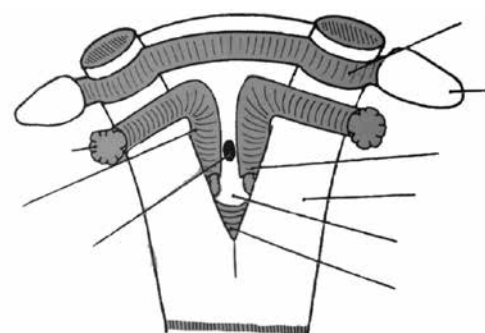
On va décrire cette face postérieure du tronc cérébral après avoir enlevé le cervelet qui l'a cache c'est-à-dire et en d'autres termes après avoir sectionné les pédoncules cérébelleux, nous avons de chaque côté un pédoncule cérébelleux supérieur, moyen et inférieur qui vont apparaître en coupe sur notre schéma par la suite.



- Le bulbe rachidien ou moelle allongée
- Sur cette face, le bulbe est formé de deux segments de hauteurs égales :
 - Un segment inférieur extra ventriculaire : c'est le bulbe fermé
 - Un segment supérieur déhissant : c'est le bulbe ouvert
- Au niveau du bulbe fermé, on décrit un premier sillon, c'est le **sillon médian dorsal** et qui n'existe que dans le segment inférieur du bulbe c'est-à-dire au niveau du bulbe fermé, car au niveau de la moitié supérieure du bulbe (bulbe ouvert) les **deux cordons postérieurs** vont s'écarter l'un de l'autre et vont délimiter le triangle inférieur ou bulbaire de la paroi postérieure du V4 ou **toit du V4 (quatrième ventricule)**
- Un deuxième sillon, le **sillon intermédiaire dorsal**, qui prolonge celui de la moelle cervicale et comme lui il va diviser le cordon postérieur en deux faisceaux, le **faisceau gracie de GOLL** en dedans et le **faisceau cunéiforme de BURDACH** en dehors. Chacun de ces deux faisceaux va se terminer à son extrémité supérieure par un petit renflement allongé, le **tubercule de GOLL** en dedans et le **tubercule de BURDACH** en dehors qui correspondent en profondeur aux noyaux homonymes.
- Au-delà de ces deux tubercules, le cordon postérieur prend désormais le nom de **corps restiforme** et se poursuit vers le cervelet par le **pédoncule cérébelleux inférieur**.
- Le **sillon dorsal latéral** ou **sillon des nerfs mixtes** laissant émerger les nerfs IX, X et XI a été déjà cité
- Le quatrième ventricule est une dilatation du canal central (de l'épendyme) du rhombencéphale. C'est-à-dire de la moelle allongée et du pont. Il est masqué par le cervelet qu'il faut ôter pour l'examiner. Il a la forme d'une pyramide à base antérieure losangique et à sommet postérieur cérébelleux. La base antérieure forme le **plancher du V4**, les parois postérieures en forment le **toit**. Quand on enlève le cervelet, on voit d'abord le toit ; il faut enlever le toit du V4 pour en voir le plancher.

A- LE TOIT DU V4

- À la forme d'un losange à deux triangles, un triangle inférieur bulbaire et un triangle supérieur pontique. Aux extrémités latérales de ce losange, on trouve les sections des pédoncules cérébelleux supérieur, moyen et inférieur.
- Revenant à l'embryogenèse, et rappelant qu'au cours de la formation du V4 qui est cette cavité ventriculaire et du pont et du bulbe, le canal épendymaire du rhombencéphale va se dilater surtout au dépend de la région dorsale et il en résulte un amincissement important des structures postérieures et qu'à la fin le toit du V4 n'est plus représenté en arrière que par une mince couche épendymaire qui est la **membrana tectoria**.
- La membrana tectoria est attachée au triangle inférieur bulbaire par des franges irrégulières de substance blanche c'est la **Ligula** et l'angle inférieur laisse apparaître un court segment de substance grise c'est l'**obex**.
- La partie centrale, on constate un espace libre, qui était obturé par le cervelet que l'on a enlevé.
- Le **voile médullaire supérieur** (ou **membrane de TARIN**) se trouve entre les pédoncules cérébelleux supérieurs, au-dessus de cette espace libre ; il est formé par la superposition d'une couche d'épendyme et d'une couche de substance blanche adhérent à et en continuité avec la **lingula du cervelet** ; il est relié à la lame tectale par un cordon blanc, le frein du voile médullaire supérieur ;
- Le **voile médullaire inférieur** (ou **membrane de VIEUSSENS**) se trouve entre la partie supérieure des pédoncules cérébelleux inférieurs, au-dessous de cet espace libre ; il est formé de la superposition d'une couche d'épendyme et d'une couche de substance blanche adhérent à et en continuité avec les floculus et le nodule du cervelet.
- La **toile choroïdienne du quatrième ventricule** occupe l'espace vacant entre le voile médullaire inférieur et les pédoncules cérébelleux inférieurs ; elle n'est pas étanche et présente à ces trois angles des déhiscences, les ouvertures latérales du quatrième ventricule de **LUSHKA** dans les angles latéraux, l'ouverture médiane du quatrième ventricule de **MAGENDIE** dans l'angle inférieur.
- Les **plexus choroïdes** du V4 forment une guirlande à la face profonde de la toile choroïdienne, qui fait issu latéralement par les ouvertures latérales du quatrième ventricule de LUSHKA comme le contenu d'une corne d'abondance renversée, c'est la **corne d'abondance de BOCHDALEK**. (Les plexus choroïdes ont grossièrement la forme d'un T majuscule à doubles barres verticales)



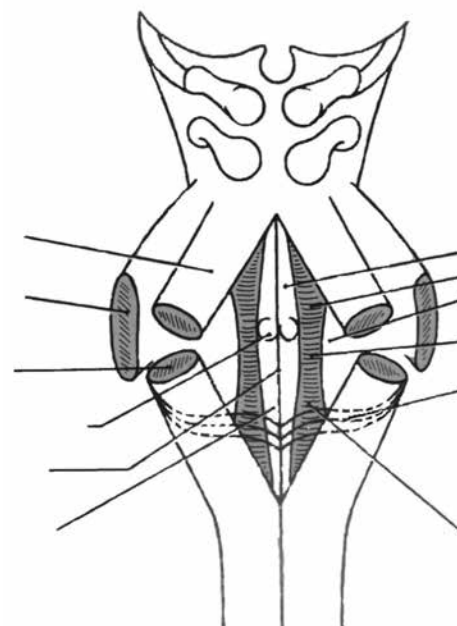
L'aqueduc du mésencéphale ou aqueduc de Sylvius, c'est la partie non dilatée et non déformée du canal central, située à la hauteur du mésencéphale, intercalée entre deux dilatations médianes, le quatrième ventricule (du rhombencéphale), en bas et en arrière, et le troisième ventricule du (prosencephale), en haut et en avant.

B-LA PAROI POSTÉRIEURE DU MÉSENCÉPHALE

- la paroi postérieure du mésencéphale correspond à la **lame tectale** ou **quadrijumelle** ou **colliculaire** à 4 collicules ; de chaque côté nous avons :
- le **collicule supérieur** ou **tubercule quadrijumeau antérieur** qui est uni par le **bras du collicule supérieur** au **corps géniculé latéral** ou **corps genouillé externe**
- le **collicule inférieur** ou **tubercule quadrijumeau postérieur** est uni par le **bras du collicule inférieur** au **corps géniculé médial** ou **corps genouillé interne**
- le **IV** est le seul nerf crânien à émerger de la face postérieure du tronc cérébral de part et d'autre du frein du voile médullaire supérieur

4 - LE PLANCHER DU V4

- Le plancher du V4 est la paroi antérieure du V4, il n'est visible qu'après avoir enlevé le toit du V4. Il a la forme d'un losange à grand axe vertical ; les **recessus latéraux** permettent de le diviser en deux triangles à bases opposées, bulbaires en bas, pontiques en haut. le plancher du V4 présente à décrire :
- **Le sillon médian** ou **la tige du Calamus** le divise en deux moitiés symétriques. Le plancher du V4 n'est pas une surface lisse, mais se présente en relief avec des zones surélevées et d'autres moins saillantes qui se succèdent de part et d'autre de la tige du Calamus :
- **L'aile blanche interne** : est une saillie longitudinale effilée à ses extrémités, située immédiatement latéralement au sillon médian et limitée en dehors par le sillon limitant ; on lui distingue de haut en bas :
 - L'éminence médiale,
 - Le collicule facial, bosse arrondie soulevée par le noyau du nerf abducens VI sous-jacent et les fibres du nerf facial qui le contournent,
 - Le trigone de l'hypoglosse, sous lequel se trouve le noyau moteur du nerf hypoglosse ;
- L'aile grise moyenne est une zone déprimée située entre la saillie des deux ailes blanches, rétrécie à sa partie moyenne, élargie à ses deux extrémités ;
 - La fossette supérieure, à l'étage pontique, où une zone bleutée latérale porte le nom de locus coeruleus (on y place certains centres de l'éveil)
 - La fossette inférieure, à l'étage bulbaire, flanquée en dedans du trigone du nerf vague, sous lequel se trouve le noyau dorsal du nerf vague ;
- L'aile blanche externe ou aire vestibulaire est une saillie arrondie occupant le plancher du recessus latéral, au-dessous de laquelle se trouvent les noyaux vestibulaires ;
- Les stries médullaires du quatrième ventricule ou stries acoustiques parcourent le plancher du V4, du recessus latéral et du noyau cochléaire dorsal qui l'occupe au sillon médian au niveau duquel elles s'enfoncent en profondeur.



III- LA SUBSTANCE GRISE DU TRONC CÉRÉBRAL

La substance grise du tronc cérébral se présente différemment de celle de la moelle épinière. Dans la moelle épinière, la substance grise est compacte et de siège central alors qu'elle est fragmentée et dispersée dans le tronc cérébral et cela en raison de 3 mécanismes :

- La fragmentation de la substance grise péri épendymaire, à l'origine des noyaux des nerfs crâniens et des noyaux Gracile, cunéiforme et cunéiforme accessoires du bulbe.
- La migration de cellules d'origine tectale (issue du toit du canal central), à l'origine des gros noyaux propres du tronc cérébral
- L'invasion du mésencéphale par des formations de substance grise issues du diencephale « qui'y manquaient de place et y sont descendues » ; la substance noire

1- LES NOYAUX DES NERFS CRÂNIENS

Les noyaux des nerfs crâniens vont se disposer sous le plancher du V4 en colonnes, nous avons 6 colonnes de chaque côté.

A- DEUX COLONNES MOTRICES dont l'origine embryologique est la lame fondamentale du tube neural et qui vont se placer sous l'aile blanche interne

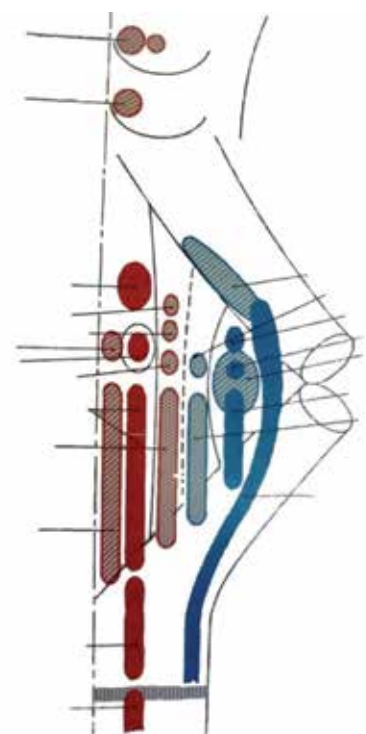
- **Une colonne somito-motrice**, en dedans, destinée aux muscles d'origine somitique c'est-à-dire :
 - Les muscles moteurs de l'œil avec de haut en bas :
 - Le noyau du III à la hauteur du collicule supérieur
 - Le noyau du IV à la hauteur du collicule inférieur
 - Le noyau du VI soulevant le collicule facial
 - Les muscles de la langue : le noyau du XII sous le trigone de l'hypoglosse
- **Une colonne branchio-motrice**, en dehors de la précédente destinée aux muscles d'origine branchiale (c'est-à-dire dérivés des arcs branchiaux) avec de haut en bas :
 - Le noyau moteur du V : noyau masticateur
 - Le noyau du VII
 - Le noyau ambigu subdivisé en deux parties pour le IX et le X
 - Le noyau laryngé pour le XI

B- DEUX COLONNES VÉGÉTATIVES issues de la zone intermédiaire du tube neural et qui vont se placer sous l'aile grise moyenne :

- **Une colonne viscéro-motrice parasympathique** en dedans composée de haut en bas de :
 - Le noyau oculomoteur accessoire ou pupillaire d'EDINGER WESTPHAL annexé au III
 - Le noyau lacrymal de YAGITA annexé au nerf facial VII en dehors du collicule facial et au-dessus du suivant
 - Le noyau salivaire supérieur annexé au nerf intermédiaire du WISEBERG VII bis en dehors du collicule facial et au-dessus du précédent
 - Le noyau salivaire inférieur annexé au nerf glosso-pharyngien IX
 - Le noyau dorsal moteur du nerf vague annexé au nerf vague X sous le trigone du nerf vague
- **Une colonne viscéro-sensible** en dehors, composée de haut en bas
 - Le noyau dorsal sensitif du IX annexé au IX
 - Le noyau dorsal sensitif du X annexé au X

C- DEUX COLONNES SENSITIVES issues de la lame alaire du tube neurale et vont se placer sous l'aile blanche externe :

- L'une correspondant à la base de la corne dorsale de la moelle, dévolue à la **proprioception et à l'équilibre**, elle est représentée par les **noyaux vestibulaires** situés sous l'aile vestibulaire du plancher du V4, à la hauteur du sillon bulbo-pontin ; on en distingue quatre principaux :
 - Le noyau vestibulaire latéral de DEITERS
 - Le noyau vestibulaire médial de SCHWALBE
 - Le noyau vestibulaire supérieur de BETCHEREW
 - Le noyau vestibulaire inférieur de ROLLER
- L'autre correspondant à la tête de la corne dorsale de la moelle, dévolue à la **sensibilité extéroceptive ou superficielle de la tête et du cou** ; elle est représentée par :
 - Les noyaux sensitifs du nerf trijumeau, tellement développés que, initialement localisés au pont, ils envahissent la partie basse du mésencéphale vers le haut, la moelle allongée et même la partie supérieure de la moelle cervicale (jusqu'à C4) vers le bas. On distingue de haut en bas :
 - Le noyau mésencéphalique
 - Le noyau pontique
 - Le noyau spinal
 - le noyau gustatif supérieur annexé au VII bis
 - le noyau gustatif inférieur annexé au IX
 - le noyau solitaire annexé au X



2- LES NOYAUX ISSUS DE LA MIGRATION DES CELLULES TECTALES

Elles peuvent migrer ventralement et former **les noyaux propres du tronc cérébral** ou dorsalement et former **les structures tectales**.

A- LES NOYAUX PROPRES DU TRONC CÉRÉBRAL

- **dans le mésencéphale :**

- **le noyau rouge**, auquel on distingue
 - le paléo-rubrum, qui forme la partie centrale faite de grandes cellules d'apparition ancienne
 - le néo-rubrum, qui forme la coque périphérique constitués de petites cellules d'apparition récente
- **le noyau interpédunculaire**
- **les noyaux pré-tectaux**, le **noyau de CAJAL** et le noyau de **DRAKSCHEWITSCH**

- **dans le pont**

- **les noyaux du pont**, semis de petits noyaux intercalés sur la voie cortico-ponto cérébelleuse, tellement nombreux qu'ils débordent dans la moelle allongée où ils prennent le nom de **noyaux arqués**
- **le noyau olivaire supérieur (ou olive protubérantielle)**, flanqué **des noyaux dorsal et ventral du corps trapézoïde**, relais sur les voies acoustiques,

- **dans la moelle allongée**

- **les noyaux arqués**, noyaux du pont aberrants, chassés du pont vers la partie supérieure de la moelle allongée, dans la région olivaire,
- **les noyaux cochléaires dorsal et ventral**, premier relais des voies acoustiques, près du recessus latéral du V4
- **le complexe olivaire inférieur** comprenant :
 - le noyau olivaire inférieur (ou olive bulbaire)** à hile ouvert en arrière et en dedans, responsable de la saillie de l'olive, latéralement au sillon ventro latéral de la moelle allongée
 - le noyau olivaire accessoire ou médial (ou paraolive médiale)**
 - le noyau olivaire accessoire latéral (ou paraolive latérale)**

B- LES FORMATIONS TECTALES PROPREMENT DITES

Il s'agit de la **lame tectale ou quadrijumelle du mésencéphale**, formée par les noyaux des collicules supérieurs et inférieurs qui soulèvent les reliefs homonymes.

3- LA SUBSTANCE NOIRE

La substance noire ou **substantia nigra** ou **locus niger** est une formation sub-thalamique, d'origine diencephalique, « chassée vers le mésencéphale qu'elle contribue à cloisonner.

(La dépigmentation du locus niger, disparition d'un grand nombre de ces neurones pigmentés et une atrophie des neurones restants donne la maladie de PARKINSON).

4- LA FORMATION RÉTICULAIRE

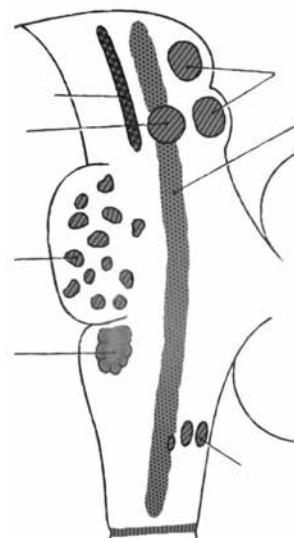
Joue un rôle primordiale dans l'éveil et le maintien de l'attention. La formation réticulaire (ou substance réticulée) est un mélange de petites cellules, à axone ramifié et à nombreuses dendrites, et de fibres nerveuses axonales entrecroisées, donnant l'aspect de poissons pris dans un filet. Grossièrement la substance réticulée s'organise en trois grandes coulées :

a- les noyaux réticulaires centraux, situés au centre de chaque moitié du tronc cérébral, formant la coule la plus haute et la plus volumineuse

b- les noyaux réticulaires latéraux, situés en dehors des précédents

c- les réticulaires médiaux ou paramédians, formant :

- une seule coulée médiane au niveau bulbo-pontin, les **noyaux du raphé**, et
- les **deux noyaux dorsaux des calottes pédunculaires de GUDDEN** au niveau mésencéphalique.



IV-LA SUBSTANCE BLANCHE DU TRONC CÉRÉBRAL

Elle est formée par les faisceaux ascendants, les faisceaux descendants, les faisceaux d'association et les fibres des nerfs crâniens qui traversent le tronc cérébral pour rejoindre ou partir de leurs noyaux.

Dans ce qui suit on se contente d'énumérer sans trop les détailler ces différentes voies.

1- LES VOIES DESCENDANTES

A-D'ORIGINE CORTICALE

- Destinée au neurone moteur de la corne antérieure de la moelle épinière : c'est la **voie cortico-spinale ou faisceau pyramidal**
- Aux noyaux moteurs des nerfs crâniens : c'est la **voie cortico-nucléaire** qui emprunte le genou de la capsule interne (ou **faisceau géniculé**)
- Soit enfin les noyaux du pont c'est le **faisceau cortico-pontin** subdivisé en fibres **fronto-pontiques** et en **fibres préo-temporo-pontiques de TURCKMEYNER**

B-D'ORIGINE SOUS CORTICALE

Elles sont issues des centres supra-segmentaires (c'est-à-dire situés topographiquement plus haut que les myélomères et les contrôlant fonctionnellement) sous corticaux (c'est-à-dire situés topographiquement plus bas que le cortex cérébral et fonctionnellement sous le contrôle-partiel du cortex cérébral). Ce sont les **voies extra pyramidales, elles participent au réglage du tonus musculaire et de la motricité automatique.**

• Le tractus rubro-spinal

Issu du noyau rouge, il croise la ligne médiane dès l'origine, dans le mésencéphale : c'est la décussation ventrale du tegmentum de FOREL. Il se place dans la partie postérieure du cordon latéral.

• Le tractus tecto-spinal

Il est issu des collicules, il croise la ligne médiane dès l'origine, dans le mésencéphale : c'est la décussation dorsale du tegmentum de MEYNER. Il se place dans la partie centrale du tronc cérébral.

• La voie vestibulo-spinale

Elle est issue des noyaux vestibulaires et se scinde dès l'origine en deux tractus :

- Le tractus vestibulo-spinal ventral, direct, dans le cordon ventral,
- Le tractus vestibulo-spinal latéral, croisé, dans le cordon latéral.

• Le tractus olivo-spinal

Il est issu du complexe olivaire bulbaire. Il est direct, c'est-à-dire qu'il ne croise pas la ligne médiane. Il se place dans la partie moyenne du cordon antérolatéral.

• Les voies réticulo-spinales

Elles sont issues de la formation réticulaire du tronc cérébral. Celle-ci donne naissance à deux tractus

- Le tractus réticulo-spinal ventral ou direct, dans le cordon ventral,
- Le tractus réticulo-spinal latéral ou croisé, dans le cordon latéral.

2- LES VOIES ASCENDANTES

A- LES VOIES SPINO-CÉRÉBELLEUSES

Ce sont les voies de la sensibilité proprioceptive inconsciente, on distingue :

- Le tractus spino-cérébelleux dorsal ou direct de FLETCHER, issu de la colonne thoracique de STILLING-CARKE. Direct au niveau de la moelle, il chemine dans le cordon latéral de la moelle épinière et allongée, puis emprunte le pédoncule cérébelleux inférieur ipsilatéral pour gagner le paléo-cervelet ipsilatéral.
- Le tractus spino-cérébelleux ventral ou croisé de GOWERS issu du noyau de BETHEW. croisé au niveau de la moelle, il chemine dans le cordon ventral de la moelle épinière et allongée, puis dans le tegmentum du pont, puis emprunte le pédoncule cérébelleux supérieur controlatéral pour gagner le paléo-cervelet ipsilatéral
- Le cordon dorsal pour la racine du membre supérieur et le cou. Le relai s'effectue dans le noyau cunéiforme accessoire de VON MONAKOW, puis le tractus cunéo cérébelleux emprunte le pédoncule cérébelleux inférieur ipsilatéral pour gagner le paléo-cervelet homolatéral

B- LES VOIES CORDONALES POSTÉRIEURES

Elles véhiculent la sensibilité proprioceptive consciente et la sensibilité extéroceptive discriminative. Ce sont le faisceau gracile de GOLL et le faisceau cunéiforme de BURDACH. Au niveau de la moelle allongée, ils font relais dans les noyaux

homologues. Le deuxième neurone croise la ligne médiane et monte vers le thalamus en empruntant un tractus rubané situé en position centrale, le lémnisque médial ou le ruban de Reil médian

C- LES VOIES SPINOTHALAMIQUES

Ce sont les voies du cordon ventro-latéral, elles véhiculent la sensibilité extéroceptive grossière : tactile grossière et thermo-algésique. Il s'agit des tractus spino-thalamique ventral et latéral.

- Le tractus spinothalamique ventral rejoint rapidement (dès la partie haute du bulbe ouvert) le lémnisque médial et s'acrole à sa face latérale ; avec lui, il monte vers le thalamus.
- Le tractus spinothalamique latéral reste en position latérale et rejoint tardivement (dans la partie haute du mésencéphale) le lémnisque médial ; comme lui et le précédent, il gagne le thalamus.

3- LES VOIES D'ASSOCIATION

A- LE TRACTUS TEGMENTAL CENTRAL

Ou faisceau central de la calotte, est un tractus longitudinal occupant la partie centrale du tronc cérébral, il est tendu entre :

- En haut, le thalamus, le noyau rouge, l'hypothalamus, les collicules, le noyau inter pédonculaire,
- En bas, le complexe olivaire inférieur, qui reçoit également le tractus spinoolivaire et envoie vers la moelle épinière le tractus olivo-spinal

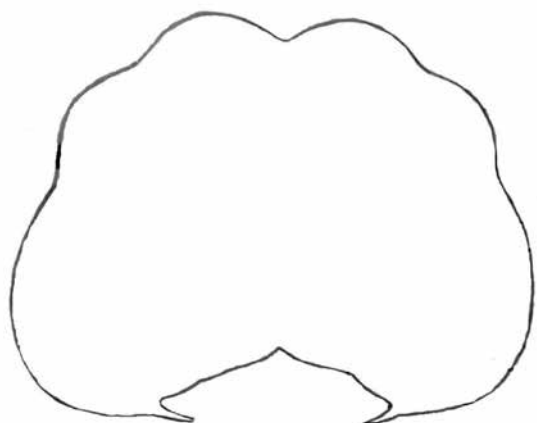
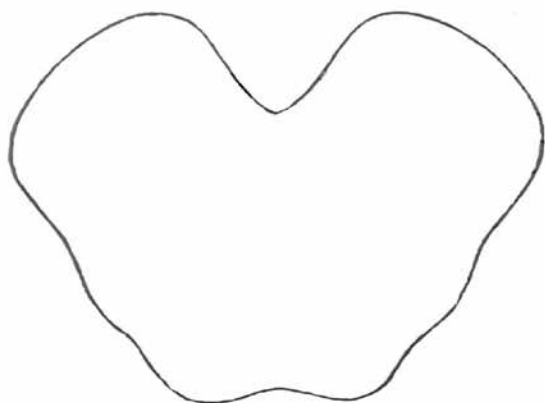
B- LE FAISCEAU LONGITUDINAL MÉDIAL

Ou bandelette longitudinale postérieure, est un faisceau longitudinal paramédical, situé en avant de la substance grise centrale du mésencéphale et des noyaux des nerfs crâniens. Il sert de voie de passage à de nombreuses fibres d'association :

- unissant l'hypothalamus et les corps mamillaires à la formation réticulaire du tronc cérébral et aux noyaux végétatifs des nerfs crâniens,
- unissant les noyaux des nerfs crâniens de l'œil entre eux (coordination des mouvements des yeux) et au système vestibulo-cochléaire,
- montant du noyau du tractus solitaire vers le thalamus

C- LE FAISCEAU LONGITUDINAL DORSAL DE SCHÜTZ

Est encore une voie longitudinale cheminant sur le plancher du V4 et unissant les noyaux des nerfs crâniens.



L'atteinte unilatérale d'un des étages du tronc cérébral peut provoquer **un syndrome alterne** fait de l'association de la paralysie d'un nerf crânien homolatéral et d'une hémiplégie controlatérale.

Les syndromes alternes sont souvent d'origine vasculaire. Deux exemples ;

- Le syndrome de **WEBER** se traduit par une paralysie homolatérale du III plus une hémiplégie croisée (lésion mésencéphalique).
- Le syndrome de **MILLIARD GUBLER** se traduit par une atteinte directe du VII et une hémiplégie croisée (lésion pontique).

LA MOELLE ÉPINIÈRE

I- CONFIGURATION EXTERNE :

La moelle apparaît comme un cordon blanc légèrement aplati d'avant en arrière, long de 45 cm environ, d'un diamètre moyen d'environ 1 cm. En haut elle se continue par le bulbe rachidien. En bas elle se continue par un cordon fibreux d'environ 25 cm de long, le « **filum terminal** ».

Ce n'est pas un cordon régulier. Il présente deux renflements, l'un à la partie haute (**renflement cervical**), l'autre à la partie basse (**renflement lombaire**).

Sa surface est parcourue par des sillons bien visibles sur une coupe horizontale :

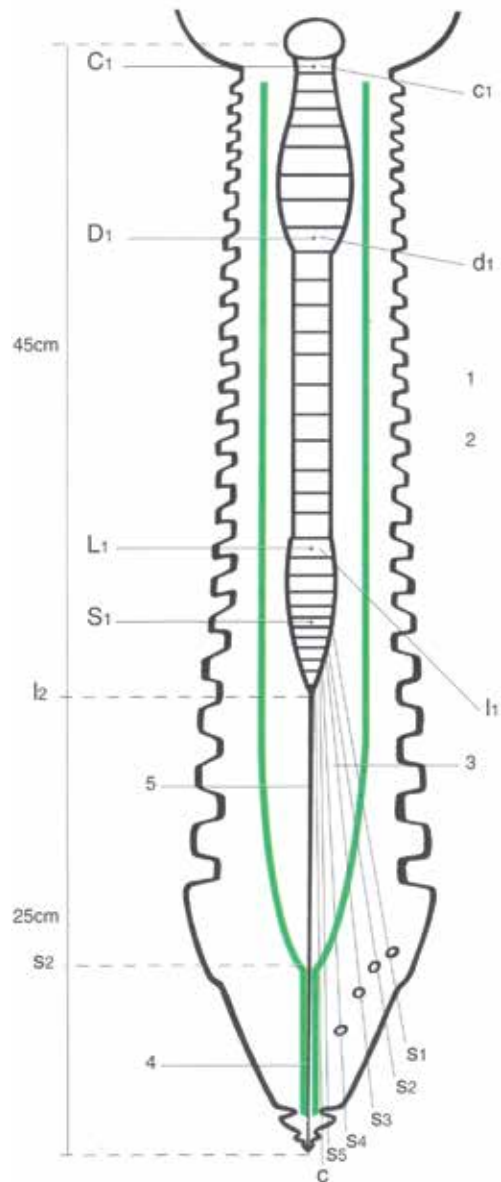
- En arrière, un **sillon postérieur ou dorsal**, peu marqué, et de chaque côté un **sillon collatéral postérieur**.
- En avant, un **sillon antérieur ou ventral**, beaucoup plus profond, avec de chaque côté un **sillon collatéral antérieur**.

De chaque sillon collatéral part un ensemble de filets nerveux : les filets qui sortent d'un sillon collatéral postérieur se regroupent par petits paquets pour former de chaque côté une **racine postérieure** ; les filets qui sortent d'un sillon collatéral antérieur forment la **racine antérieure**. Ainsi naissent de l'ensemble de la moelle, de chaque côté, 31 racines postérieures et 31 racines antérieures. Le segment de la moelle donnant les racines de même niveau s'appelle un **myélomère**. Il ya donc 31 myélomères.

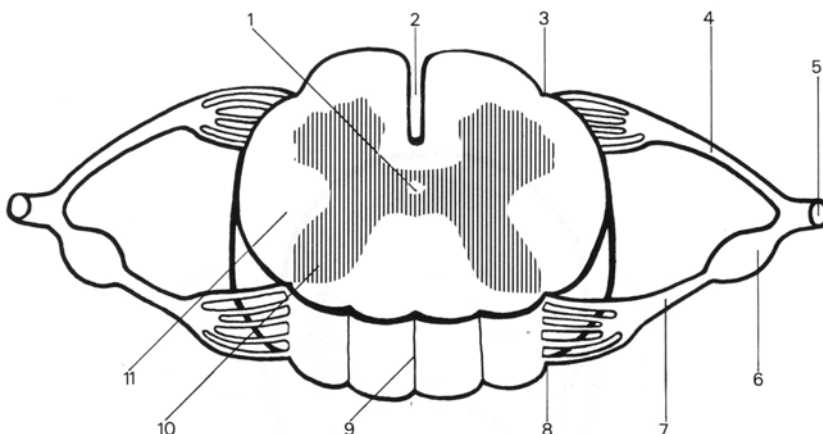
Chaque racine postérieure, après avoir présenté un renflement, le **ganglion spinal**, s'unit à la racine antérieure pour former le **nerf rachidien**.

II- CONFIGURATION INTERNE :

Sur une coupe horizontale de la moelle, on voit une partie centrale de **substance grise** en forme de H, et une partie périphérique de substance blanche. Au centre on voit un fin canal, qui s'étend sur toute la hauteur de la moelle ; il contient du liquide céphalo-rachidien : c'est le **canal de l'épendyme**. La substance grise comprend de chaque côté une **corne antérieure** renflée, une zone périépendymaire, et une **corne postérieure** effilée. La substance blanche comprend un **cordon antérieur**, un **cordon latéral** et un **cordon postérieur**. Seul ce dernier est nettement séparé ; les deux autres communiquent en avant de la corne grise antérieure si bien que l'on parle parfois de cordon antérolatéral.



Disposition générale de la moelle épinière.
1. Dure-mère. 2. Canal rachidien. 3. Queue de cheval.
4. Ligament coccygien. 5. Filum terminale.



Un myélomère.

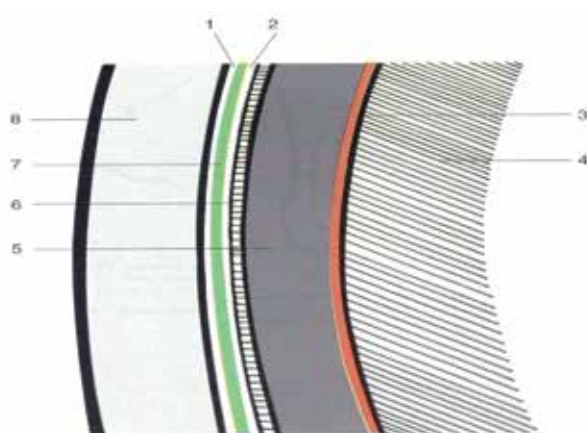
1. Canal de l'épendyme.
2. Sillon médian antérieur.
3. Sillon collatéral antérieur.
4. Racine antérieure.
5. Nerf rachidien.
6. Ganglion spinal.
7. Racine postérieure.
8. Sillon collatéral postérieur.
9. Sillon médian postérieur.
10. Substance grise.
11. Substance blanche.

III- RAPPORTS :

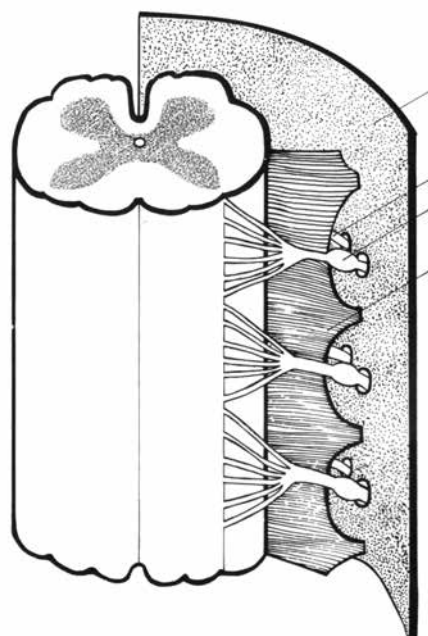
La moelle est contenue dans le canal rachidien. Celui-ci est étendu de l'atlas à l'hiatus sacré ; mais la moelle se termine en bas à la hauteur de la deuxième vertèbre lombaire. Les racines quittent le canal par les trous de conjugaison, puis plus bas par les trous sacrés, les deux dernières enfin par l'hiatus sacré.

À l'intérieur du canal, la moelle est protégée par les méninges, qui comprennent :

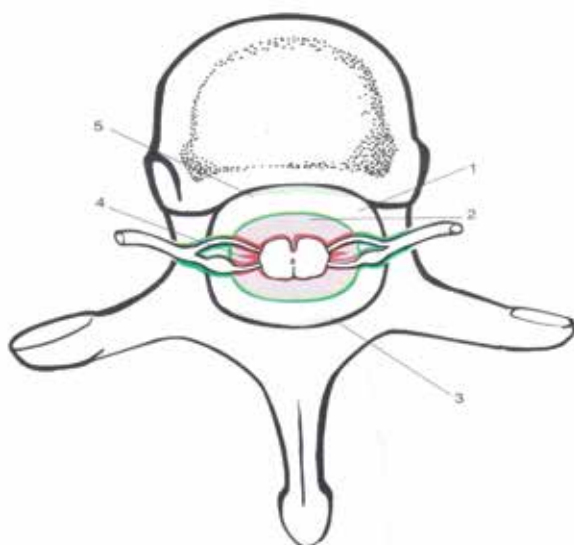
- La **dure-mère**, membrane fibreuse formant un étui continu qui se termine en bas en un cul-de-sac, se projetant à la hauteur de la deuxième ou de la troisième vertèbre sacrée. Au-dessous, le sac dural se prolonge sur le filum terminal, formant le **ligament coccygien**. Les racines perforent le sac dural par un orifice avant de gagner le trou de conjugaison. La dure-mère est séparée des parois du canal rachidien par un espace riche en veines et en graisse, **l'espace épidural**.
- **L'arachnoïde** est une membrane que l'on a voulu assimiler à une séreuse à deux feuillets. En fait, elle comprend une membrane sous-jacente à la dure-mère, et en profondeur, un espace rempli de cordages très fins et très lâches entre lesquels se trouve le liquide céphalo-rachidien : **l'espace sous-arachnoïdien**.
- Enfin, tout contre le tissu nerveux médullaire, la **pie-mère** est une fine membrane porte-vaisseaux qui se prolonge sur les racines puis les nerfs. De chaque côté de la moelle et sur toute sa longueur la pie-mère envoie une expansion verticale frontale qui, de la moelle, se porte en dehors jusqu'au sac dural, sur lequel elle se fixe de façon discontinue : c'est le **ligament dentelé** qui sépare de chaque côté la racine antérieure de la racine postérieure.



Les méninges.
1. Espace épidural. 2. Espace sous-dural. 3. Pie-mère. 4. Tissu nerveux. 5. Espace sous-arachnoïdien. 6. Arachnoïde. 7. Dure-mère. 8. Squelette.



Le ligament dentelé.
1. Dure-mère. 2. Racine antérieure. 3. Racine postérieure. 4. Ligament dentelé.



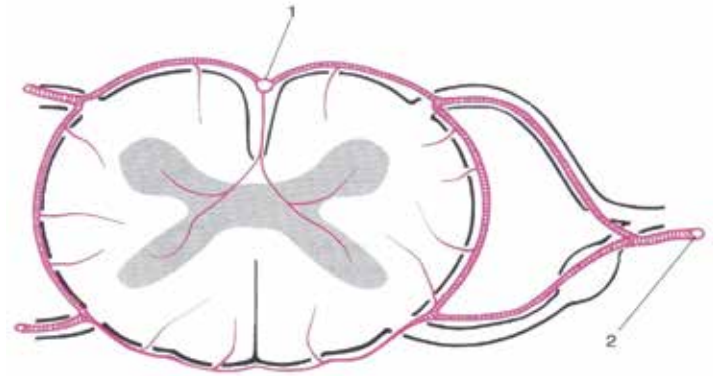
Rapport de la moelle dans le canal rachidien.
1. Espace épidural. 2. Espace intra-dural. 3. Ligament jaune. 4. Ligament dentelé. 5. Ligament vertébral commun postérieur.

La correspondance entre racines rachidiennes vertèbres n'est pas stricte. Il ya 8 racines cervicales, 12 dorsales, 5 lombaires, 5 sacrées et une coccygienne. La première racine cervicale sort au-dessus de l'atlas. La huitième racine cervicale sort au-dessous de la septième vertèbre cervicale. La cinquième racine sacrée et la racine coccygienne sortent par l'hiatus sacré.

Les premières racines cervicales sont presque horizontales, et sortent du canal rachidien à un niveau voisin de celui de leur émergence médullaire ; puis, au fur et à mesure que l'on progresse vers le bas, elles deviennent de plus en plus obliques en bas et en dehors. La dernière racine est finalement presque verticale. En outre, du fait de la terminaison de la moelle à hauteur de la deuxième vertèbre lombaire, la partie inférieure du sac dural n'est occupée que par les racines qui, tassées les une contre les autres, forment la **queue de cheval**.

IV- VASCULARISATION :

Elle est assez inégale selon le niveau considéré. En principe, par chaque trou de conjugaison pénètre une artère qui accompagne le nerf rachidien : c'est l'artère radulaire. Elle provient dans la région cervicale de l'artère vertébrale, dans la région dorsale des artères intercostales, dans la région lombaire des artères lombaires, et dans la région sacrée des artères sacrées latérales. Elle se divise en deux branches radulaires antérieure et postérieure, qui, arrivées au contact de la moelle, se divisent en deux. Ainsi est constitué, avec les homologues de l'autre côté, un cercle artériel périmédullaire. En outre, une longue anastomose longitudinale unit en avant les artères des différents étages : l'**artère spinale antérieure**, qui reçoit en haut un renforcement des deux branches de l'artère vertébrale : les artères spinales antérieures ; de plus, de petites anastomoses longitudinales postérieures existent de part et d'autre des racines postérieures.



Artères de la moelle.
1. Artère spinale antérieure. 2. Artère radulaire.

De la spinale antérieure, des artérioles pénètrent la moelle et vascularisent la plus grande partie de la substance grise ; du reste des cercles périmédullaires pénètrent des artérioles pour la substance blanche.

En fait, cette description théorique est assez inexacte, et s'il existe une disposition segmentaire au cours du développement embryologique, chez l'adulte quelques artères radulaires seulement prennent un grand développement et assurent à elles seules la vascularisation d'un grand territoire médullaire, les autres s'atrophiant. En outre, il faut opposer le segment dorsal qui est pauvrement vascularisé aux renflements cervical et lombaire, qui le sont richement. Le renflement lombaire en particulier reçoit l'essentiel de ses vaisseaux par une grosse artère radulaire arrivant par les trous de conjugaison, à un niveau qui varie de D10 à L2, appelée **artère d'Adamckievicz**.

V- ANATOMIE FONCTIONNELLE :

La moelle a conservé partiellement la disposition embryonnaire. L'embryon est fait d'un certain nombre de segments superposés : les somites. On peut retrouver dans la moelle 31 segments ou myélomères ; de chaque côté d'un myélomère, part latéralement un nerf rachidien, chaque nerf étant formé par la réunion d'une racine postérieure et d'une racine antérieure.

Sur une coupe horizontale de la moelle, on reconnaît deux zones nettement séparées : la substance grise et la substance blanche.

La substance blanche est périphérique ; on lui distingue trois cordons :

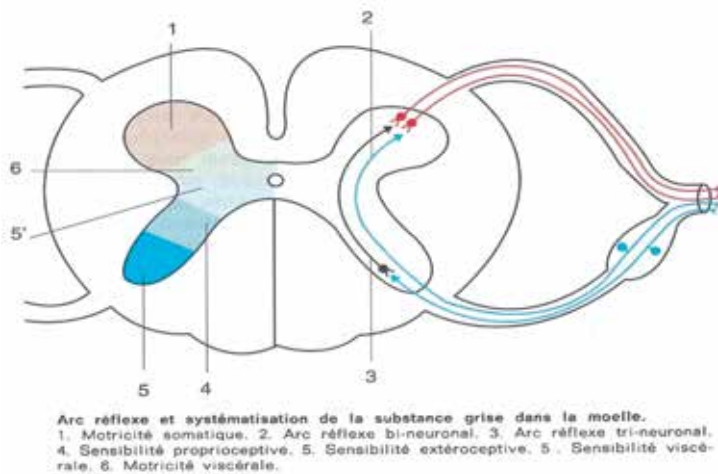
- Cordon antérieur,
- Cordon latéral (non séparés franchement et parfois englobés sous le nom de cordon antérolatéral),
- Cordon postérieur.

Elle est formée par les prolongements dendritiques et cylindraxiles des neurones.

La substance grise est centrale. Elle a une forme de H, avec deux cornes antérieures renflées, deux cornes postérieures effilées, et une zone commissurale périépendymaire. Elle est constituée par l'amas des corps cellulaires. À l'intérieur de la substance grise, on connaît assez bien la répartition des différentes cellules motrices et sensibles. Schématiquement on trouve :

- Dans la corne antérieure :
 - Tête (partie antérieure) : cellules transportant la motricité volontaire des muscles striés (somato-motricité) ;
 - Base (partie juxtaépendymaire) : cellules transportant la motricité involontaire des muscles lisses (viscéro-motricité) ;
- Dans la corne postérieure :
 - Tête : cellules transportant la sensibilité extéroceptive (c'est-à-dire tactile, douloureuse et thermique) des téguments ;
 - Col : cellules transportant la sensibilité profonde ou proprioceptive (c'est-à-dire des os, articulations et muscles) ;
 - Base : cellules transportant la sensibilité intéroceptive (c'est-à-dire celle des viscères).

Ainsi autour de l'épendyme sont groupées les cellules de la motricité et de la sensibilité viscérales, c'est-à-dire du système nerveux végétatif ; celui-ci, réparti en éléments sympathiques et parasympathiques, suit des voies complexes, utilisant les nerfs crâniens et rachidiens, et aussi la chaîne sympathique paravertébrale et ses branches.



Le fonctionnement de la moelle peut se faire de trois façons :

- Chaque myélomère peut fonctionner isolément, la moelle étant un ensemble d'étages : c'est la moelle segmentaire ;
- Un groupe plus ou moins complexe de myélomères peut fonctionner ensemble par le jeu de neurones d'association : c'est la moelle intersegmentaire ;
- Enfin, la moelle peut fonctionner comme un tout, interposé entre la périphérie et les formations nerveuses sus-jacentes, qui, chez l'homme, la tiennent sous son étroite dépendance. La moelle est alors seulement un lieu de transit.

A-LA MOELLE SEGMENTAIRE :

Le type de fonctionnement le plus simple est ce que l'on appelle l'arc réflexe : il comprend un neurone sensitif (esthésioneure), dont les dendrites partent des téguments, dont le corps cellulaire siège dans le ganglion spinal, situé sur la racine postérieure, et dont l'axone pénètre dans la moelle par la racine postérieure, traverse la corne postérieure de la substance grise pour aller se mettre en relation avec un neurone moteur. Celui-ci (dynamoneure) a ses dendrites et son corps cellulaire dans la corne antérieure et envoie son axone par la racine antérieure vers le muscle strié périphérique auquel il commande une réponse motrice. Ce réflexe est à deux neurones (réflexe bineuronal). Parfois, un neurone intermédiaire est situé entre les deux (réflexe trineuronal).

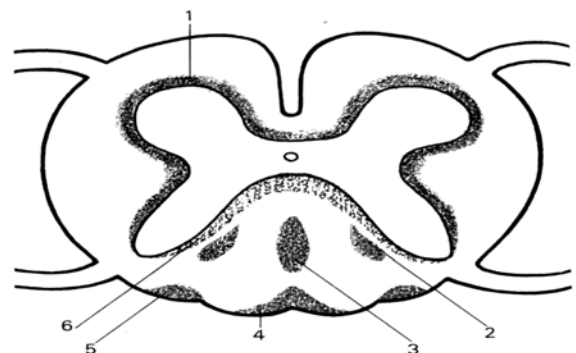
Ce mode de fonctionnement est certainement très peu utile au cours de la vie courante, dont la plupart des actes sont plus complexes. Cependant, il est utile à connaître en pathologie, car on a pu dresser une carte des différents réflexes provoqués, dont on connaît le trajet assez exactement. On sait par exemple que le réflexe rotulien passe par les deuxième et troisième myélomères lombaires, et les racines correspondantes ; que le réflexe achilléen passe par le premier myélomère sacré. On peut ainsi, par l'exploration clinique, localiser un processus pathologique.

B-LA MOELLE INTERSEGMENTAIRE :

Chaque myélomère est relié au myélomère voisin, et même aux myélomères plus éloignés par des neurones d'association groupés en faisceaux d'associations. Un certain nombre d'entre eux sont très courts, et restent dans la substance grise, reliant des neurones très voisins. Ils sont donc noyés dans la substance grise et non identifiables. D'autres, au contraire, mettent en relation des neurones plus éloignés les uns des autres, et sortent de la substance grise.

Parmi eux on distingue :

- Des neurones reliant des myélomères assez voisins ; ils sont tassés à la périphérie de la substance grise, formant le **faisceau fondamental** ;
- Des neurones reliant des myélomères plus éloignées. Ils siègent dans le cordon postérieur de la substance blanche. Les uns ont une direction ascendante : ils forment un faisceau appliqué à la partie postérieure de la substance grise : la **zone cornu-commissurale de Pierre Marie**. Les autres ont une direction descendante, groupés en un faisceau dont l'emplacement varie suivant le niveau considéré ;
 - Dans la moelle cervico-dorsale : le **faisceau en virgule de Schultze** ;
 - Dans la moelle dorsale inférieure : la **bandelette périphérique de Hoche** ;
 - Dans la moelle lombaire : le **centre ovale de Flechsig** ;
 - Dans la moelle sacrée : le **faisceau triangulaire de Gombault et Philippe**,



Faisceaux d'association dans la moelle.
1. Faisceau fondamental. 2. Faisceau en virgule de Schultze (moelle cervico-dorsale). 3. Centre ovale de Flechsig (moelle lombaire). 4. Faisceau triangulaire de Gombault et Philippe (moelle sacrée). 5. Bandelette périphérique de Hoche (moelle dorsale inférieure). 6. Zone cornu-commissurale de Pierre Marie.

Par le jeu de ces différents neurones d'association, un certain nombre de circuits multineuronaux sont possibles. Ils mettent toujours en jeu un influx sensitif médullipète et un influx moteur médullifuge. Mais ils n'entraînent qu'une activité très rudimentaire et n'ont donc dans la vie courante qu'une importance modérée.

C-LA MOELLE, LIEU DE TRANSIT :

Physiologiquement, dans les activités de la vie de relation, la moelle n'est qu'un intermédiaire entre la périphérie et les centres nerveux supérieurs. Dans la moelle on trouve ainsi un certain nombre de faisceaux, dont les uns transportent des influx ascendants sensitifs, et les autres, des influx moteurs descendants.

1- LES VOIES ASCENDANTES OU SENSITIVES :

Différents types de sensibilités doivent être distingués :

Sensibilité extéroceptive ou cutanée :

Elle est, bien sûr, consciente. Elle a son point de départ dans les corpuscules sensoriels de la peau, dont les différents types correspondent à une spécialisation précise (sensibilité au chaud, au froid, à la douleur, etc.).

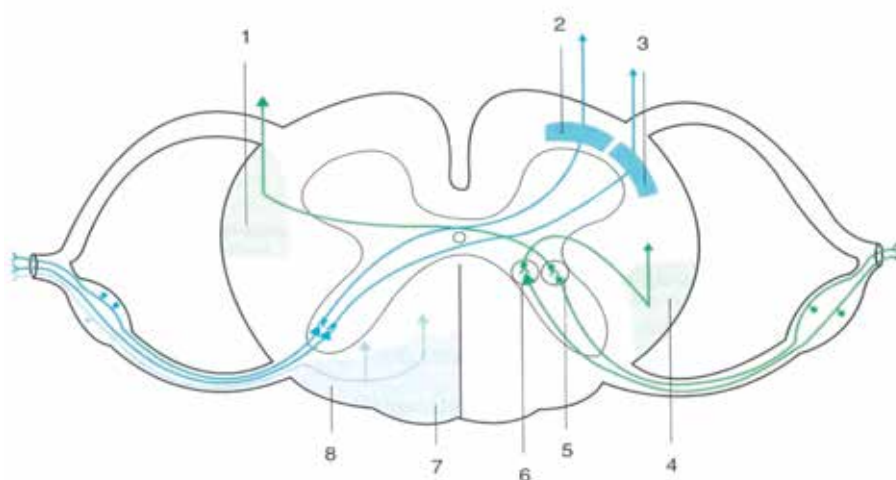
Ces corpuscules sont en rapport avec des dendrites d'un premier neurone (protoneurone), dont le corps cellulaire siège dans le ganglion spinal de la racine postérieure. Il s'agit d'un neurone en T, c'est-à-dire que dendrites et axones parviennent aux corps cellulaires par le même pôle. Les axones auront une destinée différente :

- **Sensibilité thermo-algésique** : L'axone parvient à la tête de la corne postérieure où il se met en relation avec un deuxième neurone (deutoneurone) dont les dendrites et le corps cellulaires siègent dans cette tête de la corne postérieure ; son axone traverse la ligne médiane dans la substance grise péripendymaire, et parvient dans le cordon latéral à proximité de la corne antérieure ; là, l'axone se dirige verticalement de bas en haut en direction des centres supérieurs, l'ensemble de ces axones forme le **faisceau spinothalamique dorsal ou postérieur** ;
- **Sensibilité tactile grossière ou protopathique** : Les voies sont assez semblables, mais les axones du deuxième neurone vont former un faisceau situé en avant du précédent, toujours à proximité de la corne antérieure : le **faisceau spinothalamique ventral ou antérieur**. L'ensemble des deux faisceaux spinothalamiques ventral et dorsal constituent ce que l'on appelle le **faisceau en croissant de Déjerine** ;
- **Sensibilité tactile fine ou épicritique** : Elle passe par des voies plus mal connues. Il semble bien cependant qu'elle emprunte le cordon postérieur (**faisceaux de Goll et Burdach**). En tout cas, elle ne croise pas la ligne médiane dans la substance grise péripendymaire, ce qui explique que lorsque cette dernière est atteinte de dégénérescence, au cours de la maladie appelée syringomyélie, la sensibilité tactile épicritique persiste, alors que les autres sensibilités extéroceptives sont supprimées. C'est la dissociation syringomyélique : le malade qui perçoit encore des sensations tactiles, ne perçoit plus les sensations au chaud et au froid, pouvant par exemple, se faire une brûlure importante sans s'en rendre compte.

Sensibilité proprioceptive ou profonde :

Elle peut être :

- **Consciente** : Le premier neurone a ses dendrites dans les os, les articulations ou les muscles, et son corps cellulaire dans le ganglion spinal, mais l'axone ne passe pas par la corne postérieure. Il pénètre dans le cordon postérieur du même côté, et de là, monte verticalement vers les centres sus-jacents. Au fur et à mesure que les axones arrivent dans le cordon postérieur, ils refoulent vers la ligne médiane ceux qui ont pénétré plus bas. Ainsi, les fibres d'origine cervicale sont les plus externes, les fibres d'origine sacrée les plus internes (loi de Kahler). Sur la face postérieure de la moelle, un sillon longitudinal semble séparer ce cordon postérieur en deux portions : la portion interne s'appelle faisceau de Goll, la portion externe, s'appelle faisceau de Burdach. Mais il s'agit en fait d'un seul et même faisceau ;
- **Inconsciente** : Elle transmet aux centres supérieurs (essentiellement à des centres cérébelleux) les renseignements sur la position des différents segments de membres, permettant à ces centres d'envoyer des influx correcteurs pour toute variation de cette position. Elle est donc à la base de la régulation du tonus musculaire et de la statique. Le protoneurone a son corps cellulaire dans le ganglion spinal, son axone se



Disposition des voies ascendantes (ou sensitives) dans la moelle.

En bleu foncé : sensibilité extéroceptive. En bleu clair : sensibilité proprioceptive consciente. En vert : sensibilité proprioceptive inconsciente.
1. Faisceau de Gowers. 2. Faisceau spino-thalamique ventral. 3. Faisceau spino-thalamique dorsal. 4. Faisceau de Flechsig. 5. Noyau de Bechterew. 6. Colonne de Clarke. 7. Faisceau de Goll. 8. Faisceau de Burdach.

termine dans la partie moyenne de la corne postérieure. Là se trouvent les dendrites et le corps cellulaire du deuxième neurone. Pour les membres inférieurs et le tronc, ils sont situés dans un noyau appelé colonne de Clarke. L'axone traverse ensuite la substance grise pour aller former dans la partie postérieure du cordon latéral du même côté, le **faisceau spino-cérébelleux direct de Flechsig**. Pour les membres supérieurs, ils sont situés dans le noyau de Bechterew, toujours dans la partie moyenne de la corne postérieure ; l'axone croise alors la ligne médiane dans la substance grise périépendymaire, et gagne la partie antérieure du cordon latéral opposé, formant le **faisceau spino-cérébelleux croisé de Gowers**. Ses axones iront se terminer dans le cervelet où se trouve le troisième neurone.

Sensibilité intéroceptive ou viscérale :

Ses voies sont mal connues. Il semble qu'elles suivent la substance grise de la moelle.

2- LES VOIES DESCENDANTES OU MOTRICES :

Les unes transportent les influx volontaires, venant de la circonvolution frontale ascendante du cerveau. Les autres transportent les influx involontaires, nés de différents centres nerveux sous-corticaux.

Voies de la motricité volontaire ou pyramidale :

Elles naissent des grandes cellules pyramidales de la frontale ascendante. Leurs axones se regroupent à la partie haute de la moelle en deux contingents ; les uns ayant croisé la ligne médiane dans le bulbe, forment le faisceau pyramidal croisé ; les autres, étant restés homolatéraux, forment le faisceau pyramidal direct.

Le **faisceau pyramidal croisé**, contingent le plus important, descend dans la partie moyenne du cordon latéral. À chaque myélomère, des axones pénètrent et se terminent dans la corne antérieure du même côté, où se trouvent les dendrites et le corps cellulaire du deuxième neurone ; l'axone de ce deutoneurone quitte alors la moelle par la racine antérieure pour gagner le muscle strié correspondant.

Le faisceau pyramidal direct descend dans la partie la plus interne du cordon antérieur. Des axones le quittent à chaque étage, traversent la ligne médiane pour se terminer dans la corne antérieure opposée. Là, le deuxième neurone est identique au précédent.

Ainsi, toutes les voies motrices volontaires sont croisées, soit dans le bulbe, soit dans la moelle : à une lésion de la frontale ascendante d'un côté, correspond une paralysie de l'autre côté (hémiplégie).

Voies de la motricité involontaire ou extrapyramidale :

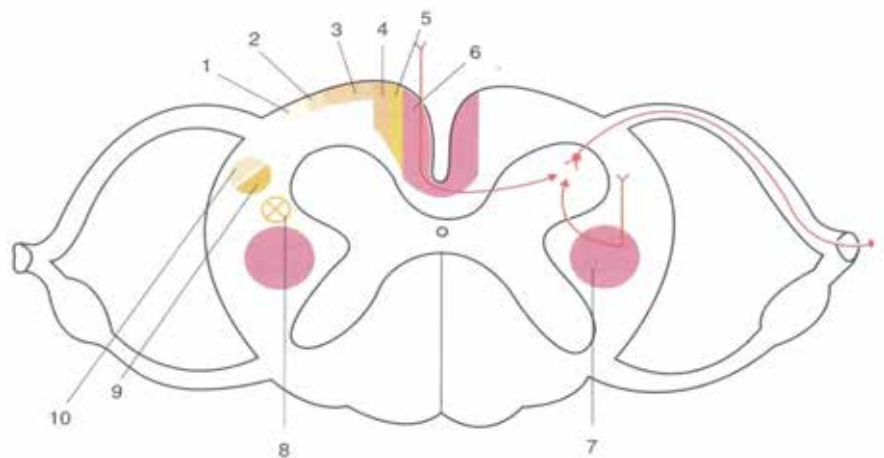
Elles n'obéissent pas à la volonté, mais transportent des influx venant d'un certain nombre de petits noyaux étagés le long du névraxe.

Ces centres reçoivent de la périphérie, des influx sensitifs ; ils envoient des influx moteurs correcteurs, et ainsi est réglé toute l'activité motrice automatique, physiologique très importante.

On trouve ainsi, dans la moelle :

- Le **faisceau rubro-spinal** : venant du noyau rouge, et situé dans le cordon latéral en avant du pyramidal croisé ;
- Le **faisceau olivo-spinal** : venant de l'olive bulbaire, et situé dans le cordon antérieur ;
- Les **faisceaux réticulo-spinaux**, l'un dorsal dans le cordon latéral, l'autre ventral dans le cordon antérieur : venant des formations réticulées, du tronc cérébral ;
- Les **faisceaux tectospinaux**, dorsal et ventral : voisins des précédents, venant des tubercles quadrijumeaux ;
- Les **faisceaux vestibulo-spinaux**, dorsal et ventral : situés dans le cordon antérolatéral, venant des noyaux vestibulaires.

À chaque myélomère, les axones de ces faisceaux sont en relation avec une cellule motrice de la corne antérieure, comme les voies de la motricité volontaire. Ainsi, les cellules de la corne antérieure de la moelle forment le deuxième neurone de toutes les voies motrices pyramidales ou extrapyramidales : c'est la voie finale commune de Sherrington.



Les voies descendantes (motrices) dans la moelle.

En rouge : voies motrices volontaires. En orange : voies motrices extra-pyramidales.

1. Faisceau vestibulo-spinal dorsal. 2. Faisceau olivo-spinal. 3. Faisceau vestibulo-spinal ventral. 4. Faisceau réticulo-spinal ventral. 5. Faisceau tecto-spinal ventral. 6. Faisceau pyramidal direct. 7. Faisceau pyramidal croisé. 8. Faisceau rubro-spinal. 9. Faisceau tecto-spinal dorsal. 10. Faisceau réticulo-spinal dorsal.

LE CERVELET

I. INTRODUCTION :

Le cervelet est une volumineuse masse nerveuse médiane, développé en arrière du tronc cérébral, pesant 140 à 150 g en moyenne, et qui a les dimensions suivantes : largeur 10 cm, hauteur 6 cm, épaisseur 5 cm. Le cervelet est situé avec le tronc cérébral dans la fosse cérébrale postérieure et il est uni à la moelle allongée par les pédoncules cérébelleux inférieurs, à la protubérance par les pédoncules cérébelleux moyens et au mésencéphale par les pédoncules cérébelleux supérieurs. Les pédoncules cérébelleux contiennent toutes les voies afférentes et efférentes au cervelet. Le cervelet ferme le IV^e ventricule en arrière avec le voile médullaire supérieur (ou valvule de Vieussens) et le voile médullaire inférieur (ou valvule de Tarin).

II. MORPHOLOGIE EXTERNE :

Si l'on compare le cervelet à un papillon à ailes étalées, il présente à décrire :

- Le corps médian ou vermis qui correspond au corps du papillon,
- Les deux lobes latéraux ou hémisphères cérébelleux qui correspondent aux ailes étalées du papillon.

1) FACES DU CERVELET :

Le cervelet présente à décrire trois faces :

- Face antérieure : elle surplombe le IV^e ventricule ; elle est formée en haut par le voile médullaire supérieur qui réunit la lingula aux deux pédoncules cérébelleux ; et en bas le voile médullaire inférieur réunissant le nodule aux deux flocculi. Fig 1.
- Face supérieure : Fig 2. en contact avec la tente du cervelet. Elle contient le culmen sur la ligne médiane qui est la région la plus culminante du cervelet. Cette face est parcourue par trois sillons principaux :
 - Sillon primaire séparant le lobe antérieur du lobe postérieur
 - Sillon postclival
 - Sillon circonférentiel séparant la face supérieure de la face inférieure.
- Face inférieure : qui est moulée dans les fosses cérébelleuses de l'os occipital. Elle répond en avant au bulbe. Son échancrure médiane laisse voir le vermis médian. Fig 3.

2) DIVISION ANATOMIQUE :

La surface du cervelet est parcourue par des sillons concentriques transversaux qui découpent le cervelet en lobes, lobules, lames et lamelles.

Le vermis est divisé en 9 lobules correspondant chacun à une paire de lobules au niveau des hémisphères (voir diagramme de Larsell). Fig 4.

III. MORPHOLOGIE INTERNE :

Le cervelet est un organe terminal, il se comporte comme un véritable cerveau. Il possède un cortex cérébelleux de surface et des fibres constituant la substance blanche, en profondeur, sous corticale. Ces fibres naissent des corps cellulaires des neurones du cortex cérébelleux de surface, leur disposition arborescente leur donne le nom de « arbre de vie ».

Ainsi l'organisation de ce cervelet est identique à celle du cerveau avec la substance grise externe et la substance blanche interne.

Il existe dans la profondeur de la substance blanche des structures fondamentales internes appelées noyaux profonds cérébelleux dans lesquels font relais les voies fonctionnelles du cervelet. Fig 5. Ces noyaux cérébelleux profonds sont au nombre de trois paires symétriques par rapport au plan médian :

- Le noyau fastigial (ou noyau du faîte), proche du toit du V4, est le plus médian
- Le noyau dentelé (ou olive cérébelleuse), latéral
- Le noyau interposé (composé du globulus et de l'embolus) est intermédiaire.

Ainsi le cervelet est organisé par un cortex cérébelleux de surface, des fibres constituant la substance blanche par lesquelles transitent les voies cérébelleuses sous corticales, et des noyaux cérébelleux profonds qui sont des amas de substance grise disséminés dans la substance blanche.

IV. EMBRYOLOGIE ET ORGANISATION FONCTIONNELLE :

Pour ce qui est de l'embryologie, on rappelle seulement que le cervelet est un dérivé de l'ectoderme, développé à partir du tube neural et est placé en dérivation sur le système nerveux central.

Le cervelet n'est pas concerné par les sensations conscientes, mais il influence tout le névraxe de façon indirecte par l'intermédiaire des noyaux du tronc cérébral.

Le cervelet peut être divisé en trois parties phylogénétiques et fonctionnelles différentes Fig 6 et 7 :

- 1) **L'archéocerebellum** : ou vestibulo-cerebellum : c'est le lobe flocculo-nodulaire. Il regroupe donc le nodulus qui appartient au vermis et les deux flocculide part et d'autre appartenant aux hémisphères cérébelleux. C'est une structure très ancienne dans le développement des espèces (on le retrouve chez les poissons), il est rattaché au système vestibulaire et donc à l'équilibre statique par rapport à la pesanteur et à la fixation du regard en fonction de la position de la tête par les connexions du système vestibulaire avec les noyaux des muscles oculomoteurs.
- 2) **Le paleo-cerebellum** : il apparaît au cours de la phylogenèse après l'archéocerebellum, avant l'apparition des membres. On le retrouve chez les amphibiens, les reptiles et les oiseaux. C'est le lobe antérieur (lobule central, culmen, uvula, pyramide, lobule quadrangulaire) qui reçoit les influx périphériques proprioceptifs des tense-récepteurs par l'intermédiaire des faisceaux spino-cérébelleux. Ce lobe antérieur régule le tonus musculaire des muscles nécessaires à la station debout et donc à la posture. On peut le considérer comme un cerveau « proprioceptif ». Il est appelé également spino-cerebellum.
- 3) **Le neo-cerebellum** : c'est le lobe postérieur. C'est la partie la plus jeune dans le développement des espèces puisqu'il est chargé de la coordination de la motricité volontaire et automatique. On le retrouve avec les mammifères et les primates. Il est en relation étroite avec le cortex cérébral par l'intermédiaire de relais : les noyaux pontiques. Par l'intermédiaire de ces noyaux, il reçoit les grandes voies cortico-cérébelleuses issues du cortex du télencéphale controlatéral. Il représente ainsi l'appareil de modulation de la motricité volontaire.

Pour chacune de ces trois divisions on décrit une systématisation qui consiste en l'étude des voies cérébelleuses qu'on développera selon un même plan :

- 1 °) les afférences qui vont de la périphérie vers le cortex cérébelleux
- 2 °) le relais intermédiaire à partir du cortex cérébelleux vers les noyaux profonds,
- 3 °) les voies efférentes à partir des noyaux cérébelleux profonds vers la périphérie.

V. SYSTÉMATISATION :

Chaque fonction cérébelleuse fait intervenir un lobe et une paire de noyaux profonds.

A/ ARCHEO-CEREBELLUM OU VESTIBULO-CEREBELLUM OU LOBE FLOCCULO-NODULAIRE : Fig 8 :

- 1 °) Les afférences : elles sont **vestibulaires** à partir des canaux semi-circulaires de l'oreille interne et par l'intermédiaire du nerf vestibulaire ou VIII^e. Le corps cellulaire de ce premier neurone est situé dans le ganglion vestibulaire (ou ganglion de Scarpa). Ce premier neurone sensoriel se destine à la fois au tronc cérébral : les noyaux vestibulaires, et au cervelet : le **lobe flocculo-nodulaire**. Ces afférences parviennent au cervelet par l'intermédiaire du **pédoncule cérébelleux inférieur homolatéral**.
- 2 °) Le relais vers les noyaux profonds : à partir du lobe flocculo-nodulaire, un relais se fait avec le **noyau fastigial** du même côté situé en profondeur dans la substance blanche du cervelet.
- 3 °) Les voies efférentes : à partir du noyau fastigial naissent les voies efférentes. Celle-ci passe **en sens inverse de la voie afférente dans le pédoncule cérébelleux inférieur** pour gagner soit à nouveau les noyaux vestibulaires du tronc cérébral réalisant ainsi une boucle vestibulo-cérébello-vestibulaire, soit le tronc cérébral et la moelle épinière constituant ainsi les faisceaux vestibulo-spinaux.

Ces voies efférentes sont homolatérales de façon prédominante. Ces faisceaux descendants vestibulo-spinaux se destinent à la moelle épinière : aux zones de la corne antérieure de la SG de la moelle épinière correspondant aux **muscles du tronc et aux extenseurs** impliqués dans le **maintien de l'équilibre**.

Il existe des connexions étroites entre les noyaux vestibulaires du tronc cérébral et 1) les noyaux des muscles oculomoteurs d'une part (par l'intermédiaire du faisceau longitudinal médial) et 2) les neurones des muscles du cou d'autre part, permettant la coordination très précise entre appareil vestibulaire, muscles moteurs de l'œil et muscles du cou. Cette coordination assure la fixation de l'objet même au cours des mouvements de la tête.

Une atteinte de ce système entraîne des **troubles de l'équilibre et de la marche** : ainsi, à la station debout, le sujet écarte les jambes pour améliorer cet équilibre et écarte les bras du tronc : c'est l'élargissement du polygone de sustentation.

Avec des enjambées courtes et irrégulières, la marche s'effectue comme celle d'un homme ivre : marche ataxique. Ces troubles ne sont pas aggravés par l'occlusion des yeux (absence de signe de Romberg).

Par ailleurs, il existe un nystagmus et une instabilité de fixation du regard.

B - LE PALEO-CEREBELLUM OU SPINO-CEREBELLUM OU LOBE ANTÉRIEUR : FIG 9 :

1 °) Les afférences : ce sont les afférences proprioceptives inconscientes véhiculées par :

- le faisceau spino-cérébelleux dorsal de Flechsig (direct) pour les membres inférieurs et la partie inférieure du tronc,
- le faisceau cunéo-cérébelleux, équivalent du précédent pour les membres supérieurs et la partie supérieure du tronc,
- le faisceau spino-cérébelleux ventral de Gowers (croisé) pour renseigner sur le niveau d'activité des systèmes contenus dans les réseaux interneuronaux de la moelle épinière.

Les faisceaux spino-cérébelleux dorsaux et cunéo-cérébelleux parviennent au lobe antérieur du cervelet du même côté par l'intermédiaire du pédoncule cérébelleux inférieur.

Le faisceau spino-cérébelleux ventral croisé au niveau de la moelle épinière parvient au lobe antérieur du cervelet toujours du même côté après avoir croisé la ligne médiane une deuxième fois dans le mésencéphale. Cette voie gagne le cervelet par le pédoncule cérébelleux supérieur dont les fibres croisent toujours.

Ainsi **les afférences spino-cérébelleuses sont homolatérales**, soit directes, soit après avoir croisé deux fois la ligne médiane (une fois dans la moelle épinière et une fois dans le mésencéphale).

2 °) **LE RELAIS INTERMÉDIAIRE** : à partir du cortex du lobe antérieur un relais vers les noyaux cérébelleux profonds se fait au **noyau interposé** (noyau globuleux et emboliforme) homolatéral.

3 °) LES VOIES EFFÉRENTES :

À partir du **noyau interposé**, un axone se destine au **noyau rouge** du mésencéphale **controlatéral** par l'intermédiaire du pédoncule cérébelleux supérieur qui croise (décussation de Wernekinck). Le noyau rouge mésencéphalique contient des neurones dont les axones constituent la voie efférente rubro-spinale à destination de la **moelle épinière** (un relais par la réticulée réalise la voie rubro-réticulo-spinale). Cette voie croise à nouveau la ligne médiane par le pédoncule cérébelleux supérieur et gagne la moelle épinière : influence les motoneurons de la corne antérieure de la substance grise de la moelle épinière correspondant aux muscles **fléchisseurs**. Ainsi il existe de nombreux croisements, mais au total les afférences et les efférences restent **homolatérales**.

L'atteinte de ce système réflexe spino-cérébello-spinal entraîne des **troubles de l'équilibre, de la marche** et une **hypotonie** à prédominance axiale par défaut du tonus de posture du même côté de la lésion.

C – LE NEO-CEREBELLUM OU LOBE POSTÉRIEUR : Fig 10 :

1 °) **LES AFFÉRENCES** : celles-ci viennent du **cortex cérébral moteur** (aires motrice et prémotrice) et du lobe temporal qui relaient dans un premier temps dans les **noyaux du pont** du même côté (faisceaux fronto-pontin d'Arnold et temporo-pontin de Türck-Meynert). À partir de ces noyaux pontiques, le deuxième neurone gagne le lobe postérieur du cervelet controlatéral par l'intermédiaire des **pédoncules cérébelleux moyens**. L'afférence est donc **croisée** pour la plupart.

2 °) **LE RELAIS** : un neurone intermédiaire fait le relais entre le cortex cérébelleux de ce lobe postérieur et le noyau cérébelleux profond impliqué dans ce système : le **noyau dentelé** homolatéral.

3 °) **LES EFFÉRENCES** : à partir du noyau dentelé, les efférences sont principalement ascendantes : vers le **thalamus controlatéral** par le pédoncule cérébelleux supérieur (décussation de Wernekinck). Puis à partir du thalamus un autre relais retourne au cortex moteur réalisant ainsi une boucle cérébro-cérébello-cérébrale de contrôle du mouvement (le cerveau contrôle que la coordination s'effectue correctement). Cervelet et cerveau se contrôlent ainsi mutuellement.

Une petite partie se destine au **noyau rouge controlatéral** par l'intermédiaire des pédoncules cérébelleux supérieurs. À partir de ce noyau rouge l'efférence croise à nouveau la ligne médiane pour regagner la moelle épinière soit directement, soit indirectement par l'intermédiaire de la réticulée du tronc cérébral et constitue ainsi deux faisceaux, un faisceau rubro-spinal et un faisceau rubro-réticulo-spinal à destination de la zone de substance grise de la moelle épinière correspondant aux muscles fléchisseurs. Il s'agit d'une voie cérébro-cérébello-spinale qui accompagne la voie cortico-spinale volontaire (ou voie pyramidale).

L'atteinte de ce système entraîne des **troubles de la coordination des muscles** se manifestant :

- dans l'espace : hypermétrie (le mouvement va trop loin), dysmétrie (le mouvement manque son but) et asynergie (décomposition du mouvement volontaire par défaut de simultanéité). On recherche cette incoordination aux membres supérieurs par l'épreuve du doigt sur le nez et aux membres inférieurs par celle du talon sur le genou.
- dans le temps : dyschronométrie (retard à l'initiation ou à l'arrêt du mouvement), tremblement intentionnel ou postural, adiadicocinésie (impossibilité d'effectuer des mouvements répétés opposés comme par exemple les marionnettes) par anomalie de la coordination des muscles agonistes et antagonistes, - dysarthrie (voie scandée et explosive), marche ataxique et troubles de l'écriture. - une hypotonie due au déficit de la contraction des muscles antagonistes qui est retardée et diminuée.

Fig 1. Cervelet : vue antérieure



Fig 2. Cervelet : vue supérieure

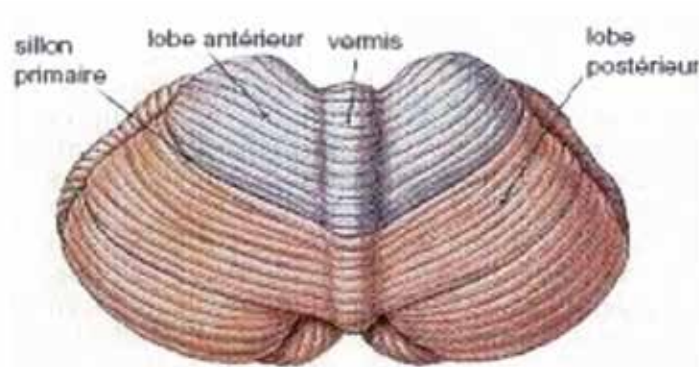


Fig 3. Cervelet : vue inférieure

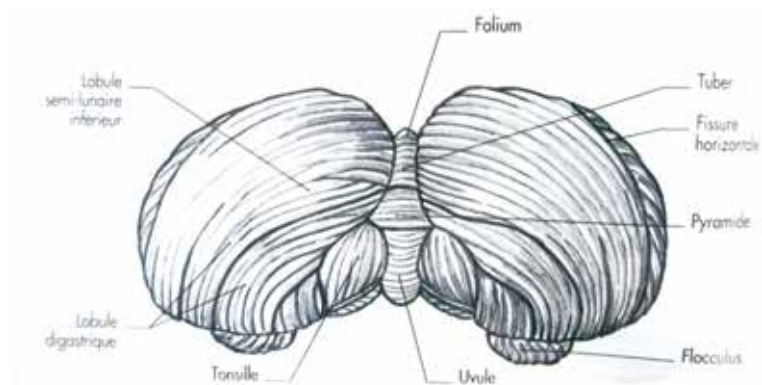


Fig 4. Diagramme de Larsell

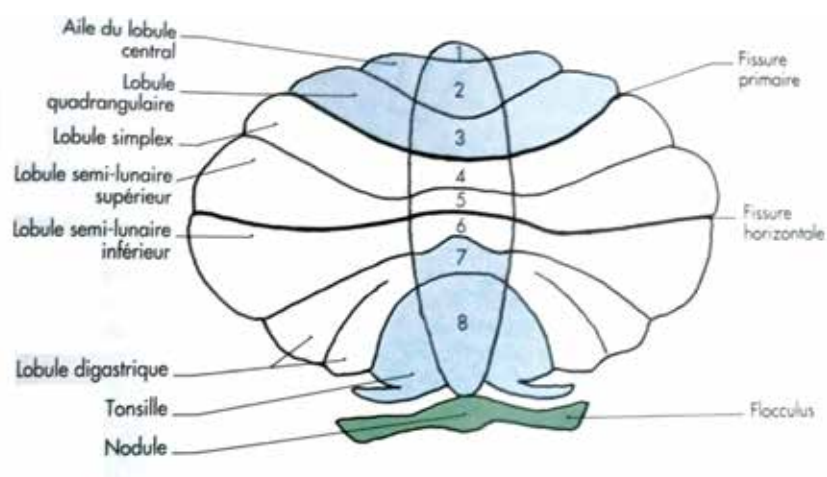
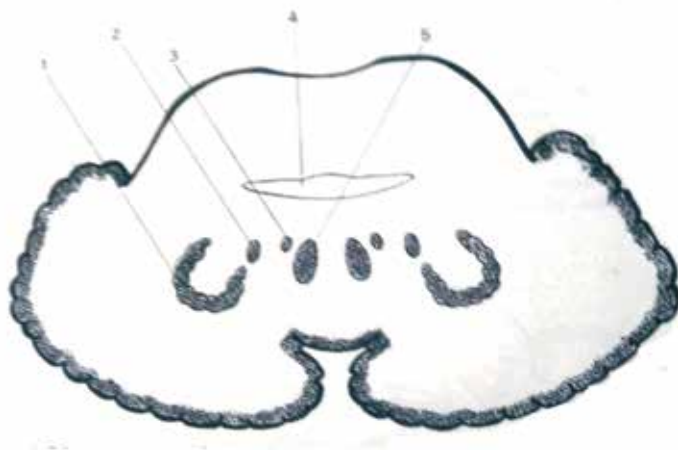


Fig 5 : Structure interne : Les noyaux du cervelet.



1. Noyau dentelé ou olive cérébelleuse.
2. Embolus.
3. Globulus.
4. Quatrième ventricule.
5. Noyau du toit.

Fig 6 et 7 : Lobes du cervelet :

1. Lobe flocculo-nodulaire. 2. Lobe antérieur. 3. Lobe postérieur

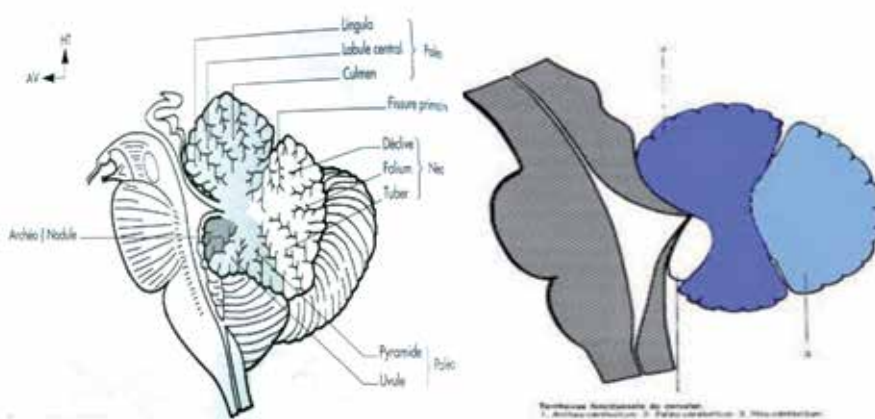


Fig 8 : Vestibulocerebellum

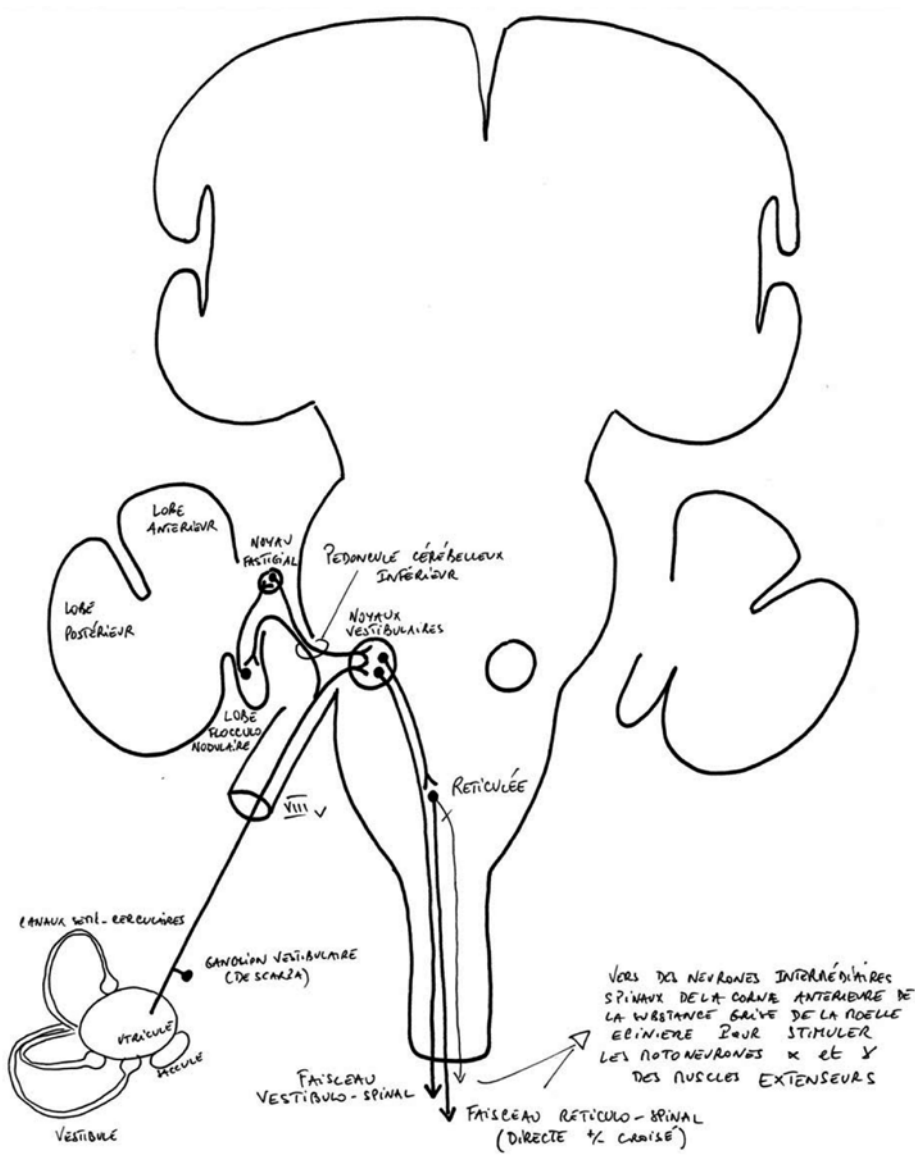


Fig 9 : Paleocerebellum

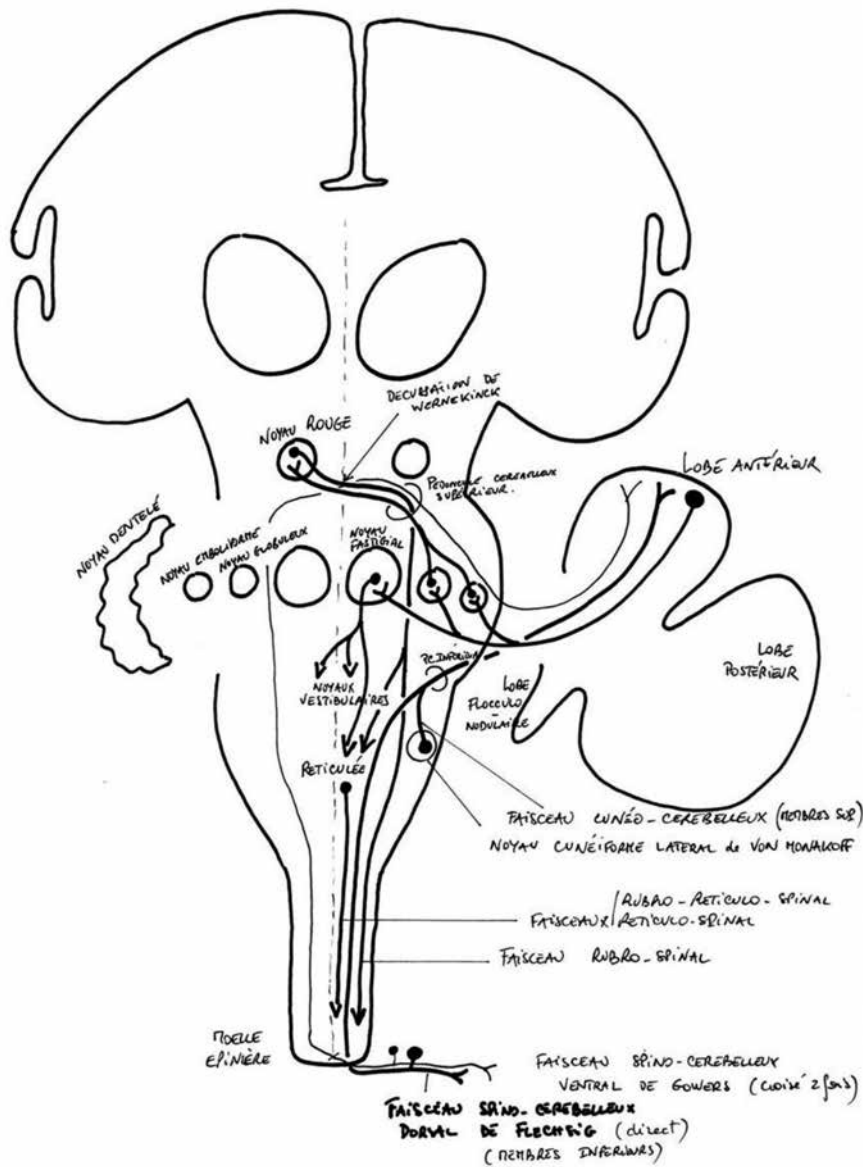
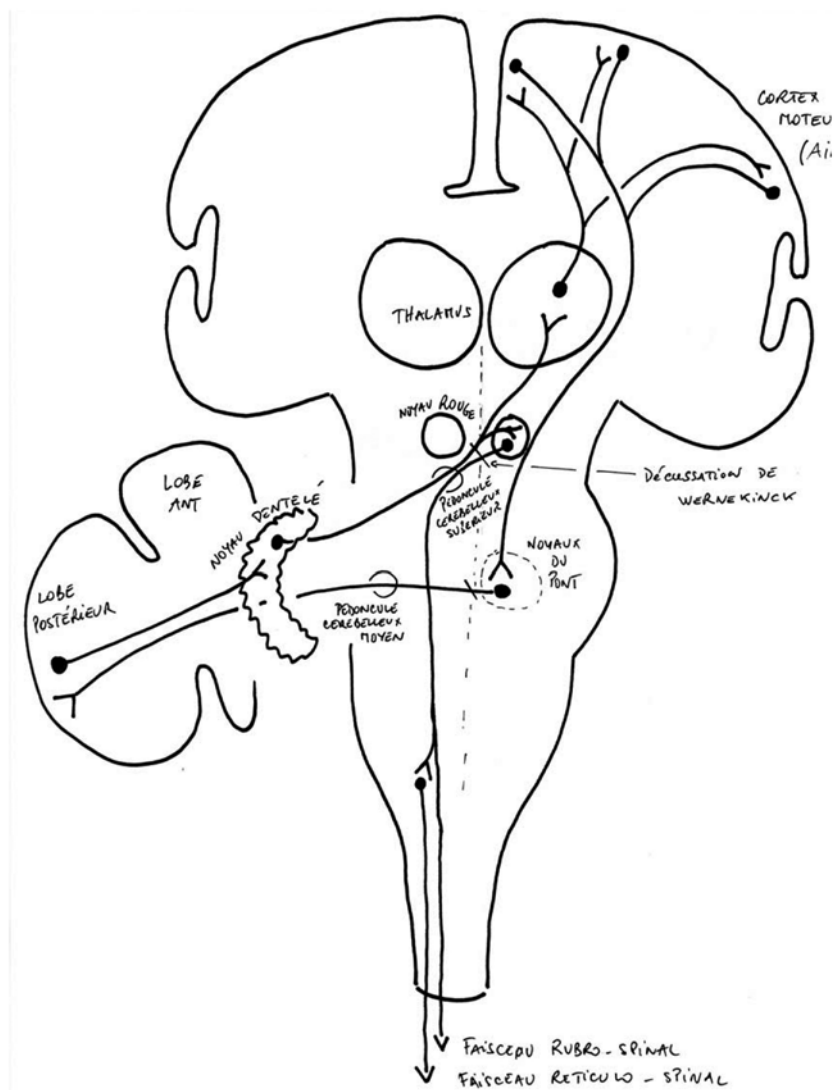


Fig 10 : Neocerebellum



LA VASCULARISATION CEREbraLE

L'encéphale est vascularisé par quatre grandes artères : les deux artères carotides internes et les deux artères vertébrales. Ces deux systèmes sont réunis à la base du crâne en un cercle artériel anastomotique : le polygone de Willis.

I-LA VASCULARISATION ARTÉRIELLE

A-L'ARTÈRE CAROTIDE INTERNE :

Branche terminale de l'artère carotide commune, elle naît dans la région cervicale en regard de C4, puis monte dans l'espace rétrostylien sans donner de branches. Arrivée à la base du crâne elle pénètre dans le canal carotidien dans lequel elle chemine avant d'entrer dans la fosse cérébrale moyenne par le foramen lacerum. Dans ce trajet intrapétreux, elle est entourée d'un plexus veineux et d'un plexus sympathique. Elle présente ensuite un siphon comprenant cinq segments.

Les trois premiers sont intracaverneux. Le premier segment est médial au ganglion trigéminal (segment C5 ou gassérien); le deuxième segment est horizontal et parallèle au plancher de la selle turcique (segment C4 ou sellaire); le troisième segment (C3) est une boucle à convexité antérieure au cours de laquelle l'artère contourne le processus clinéoïde antérieure, perfore la dure-mère médialement à ce dernier pour passer dans l'espace sous-arachnoïdien. Dans le sinus caverneux, elle donne des branches pour l'hypophyse, les méninges et les nerfs crâniens.

Les deux derniers segments sont supracaverneux (C2 et C1). L'artère est alors en situation latérale au nerf optique; elle donne l'artère ophtalmique médialement au processus clinéoïde antérieur; celle-ci se dirige en avant, traverse le canal optique en croisant le nerf optique de dehors en dedans; elle donne de nombreuses branches au contenu orbitaire et au bulbe de l'œil, et s'anastomose avec les branches du système carotidien externe.

L'artère carotide interne se divise en quatre branches terminales : l'artère cérébrale antérieure, l'artère cérébrale moyenne ou sylvienne, l'artère communicante postérieure et l'artère choroïdienne antérieure.

1-L'ARTÈRE CÉRÉbraLE ANTÉRIEURE :

C'est la branche de terminaison médiale de l'artère carotide interne. Elle présente un premier segment cisternal (A1) au-dessus du nerf optique et du chiasma et un deuxième segment (A2) dans la scissure interhémisphérique au cours duquel elle passe en avant de la lame terminale, suit le genou du corps calleux et se poursuit par l'artère péricalléuse (A3) à la face dorsale du corps calleux. Les deux artères cérébrales antérieures sont réunies par l'artère communicante antérieure à la jonction des segments A1 et A2; cette artère constitue le segment antérieur du polygone de Willis. Peu après la naissance de l'artère communicante antérieure, naît une artère récurrente : l'artère centrale de Heubner qui pénètre le tissu cérébral à travers la substance perforée antérieure et vascularise le bras antérieur de la capsule interne et les parties attenantes de la tête du noyau caudé et du putamen.

De l'artère cérébrale antérieure part une branche vers la face basale du lobe frontal : l'artère fronto-basale médiale (ou orbito-frontale médiale). D'autres rameaux s'étalent sur la face médiale de l'hémisphère; ce sont les artères frontales médiales ou internes (antérieure, moyenne et postérieure), l'artère fronto-polaire, l'artère du lobule paracentral qui vascularise la région motrice du membre inférieur, et les artères pariétales médiales ou internes (supérieure et inférieure).

L'artère cérébrale antérieure vascularise la face médiale des hémisphères cérébraux située rostralement au sillon pariéto-occipital, ainsi qu'une bande de cortex au bord supérieur des hémisphères (anastomotique avec le territoire cortical de l'artère cérébrale moyenne. Elle vascularise aussi le corps calleux.

2- L'ARTÈRE CÉRÉbraLE MOYENNE :

Elle suit l'axe de l'artère carotide interne, et constitue sa plus grosse branche de division, se dirigeant en dehors vers le sillon latéral et abandonnant au-dessus de la substance perforée antérieure 8 à 10 rameaux striés qui pénètrent dans le tissu cérébral : les artères striées latérales ou lenticulo-striées. Elle se divise le long de son trajet en un segment M1 à la base du crâne (entre l'uncus et les stries olfactives), un segment M2 dans la fissure latérale contre le lobe de l'insula, un segment M3 à la partie postérieure de la vallée sylvienne, et un segment M4 ou segment terminal.

Cette artère donne neuf branches corticales qu'on peut diviser en branches ascendantes et descendantes. Les branches ascendantes sont : l'artère fronto-basale latérale (ou orbito-frontale latérale), l'artère frontale ascendante (ou préfrontale), l'artère du sillon précentral, l'artère du sillon central, l'artère du sillon postcentral, et l'artère pariétale postérieure. Les branches descendantes sont : l'artère temporo-polaire, les artères temporales (antérieure, moyenne et postérieure), et l'artère temporo-occipitale. Ces artères naissent du segment M2 au fond de la vallée sylvienne. La branche terminale de l'artère cérébrale moyenne est l'artère angulaire ou artère du pli courbe.

L'artère cérébrale moyenne vascularise les 2/3 de la face latérale des hémisphères, rostralement à une ligne joignant l'incisure temporo-occipitale au sillon pariéto-occipital. Elle ne vascularise généralement pas la moitié inférieure de T3. Les

Ce poly a été téléchargé depuis <http://med-tmss.blogspot.com/2016/08/cours.html>

artères striées latérales sont destinées à la vascularisation de la partie supérieure du bras antérieure de la capsule interne, du bras postérieur, du putamen, du corps et de la queue du noyau caudé.

3-L'ARTÈRE CHOROÏDIENNE ANTÉRIEURE :

C'est la branche la plus grêle de la carotide interne ; elle présente un trajet récurrent durant lequel elle suit le tractus optique, puis pénètre dans la corne temporale pour vasculariser le plexus choroïde. Elle vascularise le tractus optique, l'uncus et l'hippocampe ; elle donne aussi des branches au genou de la capsule interne et au pallidum interne.

4- L'artère communicante postérieure :

Elle naît de l'artère carotide interne et rejoint l'artère cérébrale postérieure à la jonction de ses segments P1 et P2. Elle participe à la constitution du cercle artériel anastomotique du cerveau (segment latéral du polygone de Willis), et anastomose le système carotidien interne au système vertébrobasilaire. Elle ne donne que des branches profondes pour le thalamus.

B-LE SYSTÈME VERTÉBROBASILAIRE:

Il est formé par la réunion, à la partie supérieure de la moelle allongée, des deux artères vertébrales en une artère (ou tronc) basilaire.

1-L'ARTÈRE VERTÉBRALE :

C'est une branche de l'artère subclavière dont le trajet présente à décrire quatre segments :

- Cervical ou prévertébral (V1) entre son origine et son entrée dans le foramen transversaire de C6
- Vertébral ou transversaire (V2) entre C6 et C2
- Infra-occipital ou atloïde (V3) où elle décrit une boucle avant de perforer la dure-mère au-dessus de l'orifice de sortie du premier nerf cervical
- Intracrânien ou cérébral (V4) où son trajet est oblique en haut et en dedans

À la face ventrale de la moelle allongée, généralement au niveau du sillon bulbo-protubérentiel et sur la ligne médiane, elle s'anastomose avec son homologue pour former le tronc basilaire. Les artères vertébrales donnent naissance aux artères spinales antérieures et postérieures.

2-LE TRONC BASILAIRE :

Né de la réunion des deux artères vertébrales au niveau du sillon bulbo-pontique, il chemine sur la face ventrale du pont dans la gouttière basilaire et se divise sur la ligne médiane au niveau du sillon ponto-mésencéphalique en deux artères cérébrales postérieures ; celles-ci sont anastomosées au système carotidien par l'intermédiaire des artères communicantes postérieures, constituant ainsi le segment postérieur du polygone de Willis.

Embryologiquement l'artère cérébrale postérieure est une branche de la carotide interne à laquelle elle est reliée par la fine artère communicante postérieure ; elle reçoit ainsi la plus grande partie de son apport sanguin des artères vertébrales et c'est pour cela qu'on attribue cette artère à la circulation postérieure. Son trajet se divise en un segment cisternal (P1) entre son origine et la rencontre de la communicante postérieure, un segment P2 cheminant à la face inféromédiale de l'hémisphère (entre T5 et le mésencéphale), et un segment P3 entre le pulvinar et le sillon calcarin. L'artère cérébrale postérieure se ramifie à la face médiale du lobe occipital et à la face basale du lobe temporal. Elle vascularise également le mésencéphale, le pôle postérieur du thalamus et le bras postérieur de la capsule interne ainsi que la queue du noyau caudé.

3- BRANCHES COLLATÉRALES DU SYSTÈME VERTÉBROBASILAIRE :

Ce système se distribue en trois types de branches qui en fonctions de leur longueur sont nommées : artères perforantes paramédianes (vascularisant les territoires paramédians du tronc cérébral), artères circonférentielles courtes pour les territoires latéraux, et artères circonférentielles longues ou cérébelleuses. Il existe trois artères cérébelleuses :

Artère cérébelleuse postéro-inférieure (PICA) :

Elle naît le plus souvent de l'artère vertébrale dans son segment intracrânien, contourne la moelle allongée latéralement pour effectuer une boucle à concavité supérieure autour de la tonsille (ou amygdale) cérébelleuse. Elle donne des branches au plexus choroïde du 4^e ventricule, à la face inférieure des hémisphères cérébelleux et du vermis.

Artère cérébelleuse antéro-inférieure (AICA) :

Née du tronc basilaire, elle est satellite du nerf vestibulo-cochléaire et du nerf facial lors de leur émergence du tronc cérébral, puis elle chemine à la face antérieure des hémisphères cérébelleux. Elle donne des branches pour la face antérieure du cervelet et souvent l'artère labyrinthique destinée à la vascularisation de l'oreille interne.

Artère cérébelleuse supérieure :

Née juste avant la terminaison du tronc basilaire, elle contourne le mésencéphale pour vasculariser la face supérieure du cervelet. L'origine apparente du nerf oculomoteur est située dans une pince artérielle formée par l'artère cérébrale postérieure rostralement et l'artère cérébelleuse supérieure caudalement. Ainsi une pathologie de la terminaison du tronc basilaire telle qu'un anévrysme peut expliquer l'atteinte du III.

C-LE CERCLE ARTÉRIEL DU CERVEAU (POLYGONE DE WILLIS)

Les branches terminales des artères vertébrales et carotides internes, et les anastomoses qui les unissent entre elles dessinent à la base du cerveau et tout autour de la selle turcique une figure heptagonale connue sous le nom de polygone de WILLIS. Les côtes de l'heptagone sont constituées :

- 1/ En avant par les deux segments cisternaux (A1) des artères cérébrales antérieures et par l'artère communicante antérieure.
- 2/ En arrière par les segments P1 des deux artères cérébrales postérieures.
- 3/ Latéralement par les deux artères communicantes postérieures.

II-LA VASCULARISATION VEINEUSE

La vascularisation veineuse de l'encéphale n'est pas superposable à la vascularisation artérielle ; elle comprend un riche réseau de veines superficielles et profondes, dépourvues de valvules, qui se drainent toutes dans les sinus veineux de la dure-mère.

A-LES VEINES SUPERFICIELLES :

Elles cheminent dans l'espace sous-arachnoïdien recouvrant les hémisphères cérébraux ; elles drainent le cortex et la substance blanche sous-jacente, et elles se drainent à leur tour dans les sinus dure-mériens. La partie supérieure de chaque hémisphère se draine dans le sinus sagittal supérieur ; la partie moyenne dans le sinus caverneux par l'intermédiaire de la veine cérébrale moyenne superficielle ; la partie inférieure dans le sinus transverse.

La veine anastomotique supérieure (veine de Trolard) unit la veine cérébrale moyenne superficielle et le sinus sagittal supérieur ; la veine anastomotique inférieure (veine de Labbé) parcourt la face latérale du lobe temporal et unit la veine cérébrale moyenne superficielle au sinus transverse. Ces veines anastomotiques ne sont pas fonctionnelles à l'état normal ; elles ne sont pas visibles angiographiquement, et leur mise en évidence peut être considérée comme un signe de thrombose.

B-LES VEINES PROFONDES :

Elles collectent le sang provenant du diencéphale, des structures profondes des hémisphères et de la substance blanche profonde. Les veines profondes du cerveau déversent leur sang dans la grande veine cérébrale de Galien.

1-VEINE CÉRÉBRALE INTERNE :

Elle prend naissance au niveau du foramen interventriculaire de Monroe par la réunion de la veine du septum pellucidum (cheminant à la face latérale du septum), de la veine thalamostriée (cheminant dans le sillon thalamostrié), et de la veine choroïdienne (cheminant dans le sillon choroïdien du thalamus). La veine cérébrale interne part du foramen de Monroe, passe au-dessus de la face médiale du thalamus et chemine jusque dans la région pinéale où elle va former avec son homologue controlatérale et les veines basales la grande veine cérébrale de Galien.

2-VEINES BASALES (BASILAIRES DE ROSENTHAL) :

Elles naissent dans la région de la substance perforée antérieure par la réunion de la veine cérébrale antérieure et de la veine cérébrale moyenne profonde. Elles enjambent ensuite le tractus optique, contournent les pédoncules cérébraux puis se dirigent vers la citerne ambiante pour remonter ensuite jusque sous le splénium du corps calleux où elles s'abouchent dans la grande veine de Galien.

3-LA GRANDE VEINE CÉRÉBRALE DE GALIEN :

C'est un court tronc veineux formé par la réunion des deux veines cérébrales internes et des deux veines basales ; elle forme un arc autour du splénium du corps calleux pour aboutir dans le sinus droit (sinus rectus).

C-LES SINUS VEINEUX DE LA DURE-MÈRE:

Ce sont des canaux veineux creusés dans un dédoublement de la dure-mère ; leurs parois sont avalvulaires. On distingue les sinus antérioro-inférieurs situés au niveau de la base du crâne, et les sinus postéro-supérieurs situés dans la cavité crânienne.

1-LES SINUS DE LA BASE :

- a- **le sinus sphéno-pariétal** : reçoit la veine cérébrale moyenne superficielle, puis longe la petite aile du sphénoïde et se jette dans le sinus caverneux.
- b- **le sinus caverneux** : placé sur le flanc de la selle turcique, il a la forme d'une pyramide quadrangulaire ; c'est un plexus formé de veines distinctes les unes des autres, et divisé en deux loges par une cloison dure-mérienne sagittale. Dans la loge médiale chemine dans le sang veineux l'artère carotide interne et le VI ; la loge latérale est remplie de sang veineux. Dans le dédoublement de la cloison sagittale qui divise le sinus caverneux, on retrouve de bas en haut le V1, le IV et le

III ; le V2 est situé à l'union des parois inférieure et latérale du sinus. Le sinus caverneux reçoit les veines ophtalmique, centrale de la rétine, cérébrale moyenne superficielle et le sinus sphéno-pariétal.

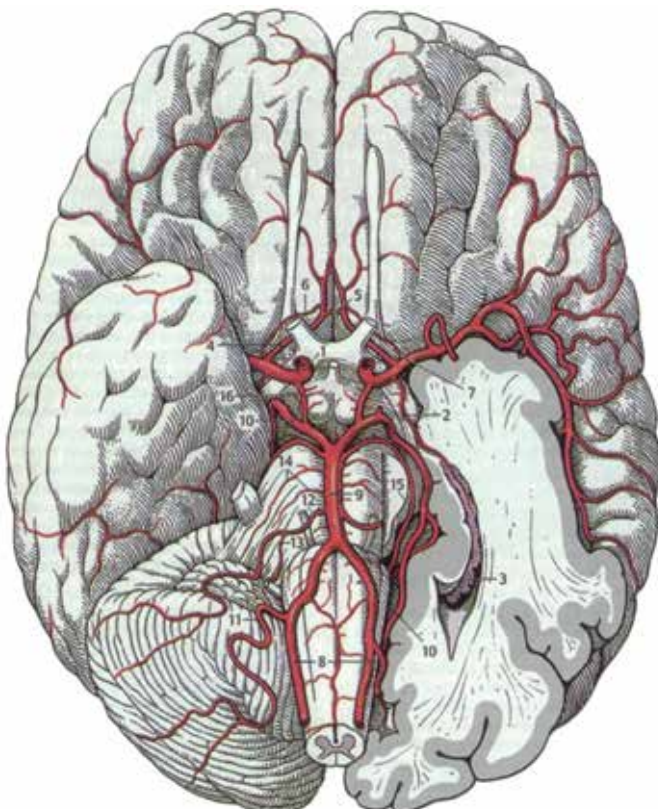
- c- le sinus intercaverneux ou coronaire** : placé dans la tente de l'hypophyse (diaphragme sellaire), il est formé de deux arcs l'un antérieur, l'autre postérieur qui font communiquer les deux sinus caverneux.
- d- le sinus pétreux supérieur** : il longe le bord supérieur du rocher dans la grande circonférence de la tente du cervelet, et relie le sinus caverneux au sinus sigmoïde.
- e- le sinus pétreux inférieur (ou pétro-occipital)** : il draine le sinus caverneux dans le golfe de la jugulaire et chemine dans le sillon de la fissure pétro-occipitale.
- f- le plexus basilaire (sinus occipital transverse)** : il longe la face postérieure de la lame quadrilatère et réalise une large anastomose entre les deux extrémités postérieures du sinus caverneux.
- g- le sinus occipital** : naît du confluent des sinus, chemine le long de la faux du cervelet jusqu'au foramen magnum et s'anastomose avec le golfe de la jugulaire.

2- LES SINUS DE LA VOÛTE :

- a- le sinus sagittal (ou longitudinal) supérieur** : il chemine dans l'insertion du bord convexe de la faux du cerveau et s'étend de la crête frontale jusqu'à la protubérance occipitale interne où il se termine dans le confluent postérieur des sinus ou torcular. Son calibre augmente d'avant en arrière.
- b- le sinus sagittal (ou longitudinal) inférieur** : Souvent grêle, il occupe le bord libre de la faux du cerveau et se jette en arrière dans le sinus droit.
- c- le sinus droit (sinus rectus)** : chemine d'avant en arrière dans l'insertion de la faux du cerveau sur la tente du cervelet et se jette dans le torcular.
- d- le confluent postérieur des sinus ou torcular (pressoir d'Hérophile)** : il est formé au niveau de la protubérance occipitale interne par la confluence du sinus sagittal supérieur, du sinus occipital et du sinus droit.
- e- le sinus transverse** : triangulaire à la coupe, il est situé entre l'insertion du bord postérieur de la tente du cervelet et la dure-mère tapissant l'écaille de l'os occipital. Il unit le torcular au sinus sigmoïde.
- f- le sinus sigmoïde** : chemine entre le processus mastoïde de l'os temporal et le processus jugulaire de l'os occipital ; il se draine au niveau du foramen jugulaire dans la veine jugulaire interne.

L'ensemble sinus transverse et sinus sigmoïde correspond au sinus latéral dans l'ancienne nomenclature.

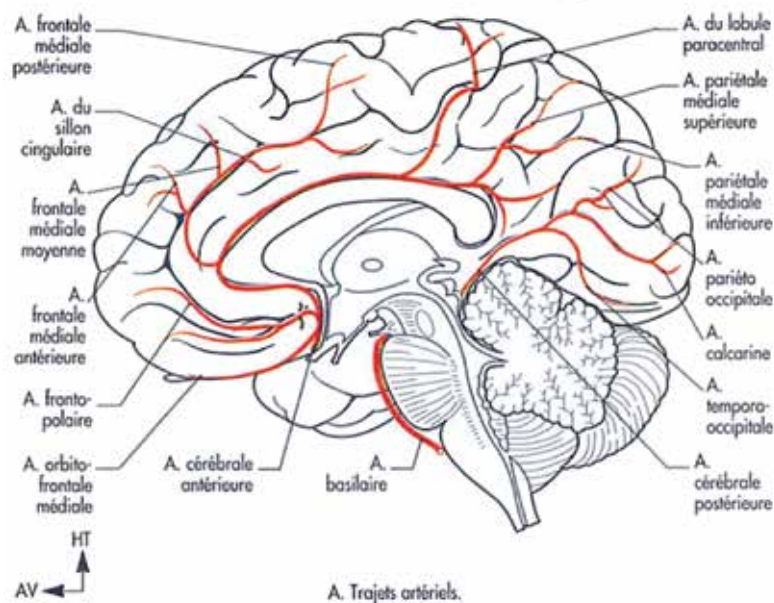
En définitive la totalité de la circulation veineuse de l'encéphale à part quelques voies accessoires (veines émissaires de la voûte, veines des foramens de la base et les plexus vertébraux), se fait vers une voie de drainage essentielle : la veine jugulaire interne directement branchée sur le système cave supérieur.



- 1- Artère carotide interne
- 2- Artère choroïdienne antérieure
- 3- Plexus choroïde
- 4- Artère cérébrale antérieure
- 5- Artère communicante antérieure
- 6- Artère centrale longue de Heubner
- 7- Artère cérébrale moyenne
- 8- Artères vertébrales
- 9- Tronc basilaire
- 10- Artère cérébrale postérieure
- 11- Artère cérébelleuse postéro-inférieure (PICA)
- 12- Artère cérébelleuse antéro-inférieure (AICA)
- 13- Artère labyrinthique
- 14- Rameaux pontiques
- 15- Artère cérébelleuse supérieure
- 16- Artère communicante postérieure

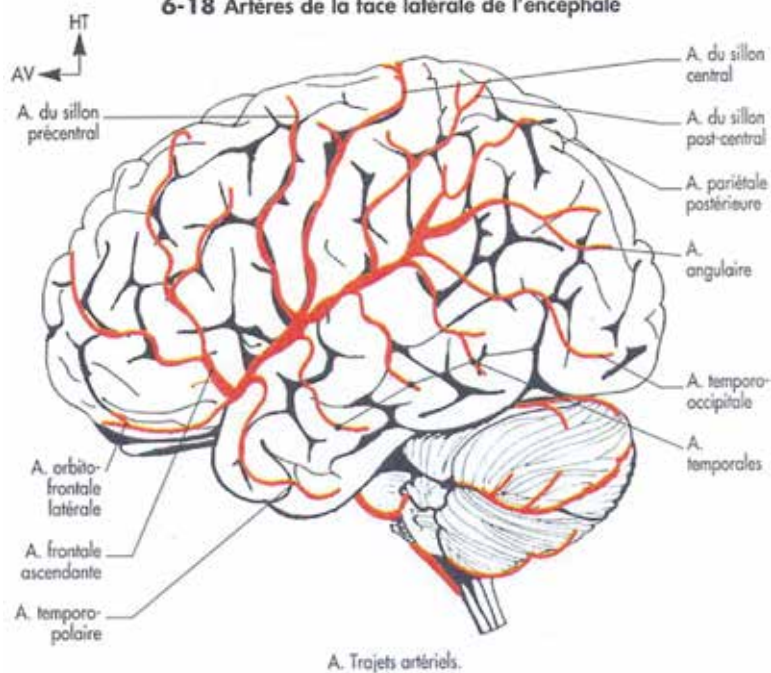
Artères de la face médiale des hémisphères cérébraux

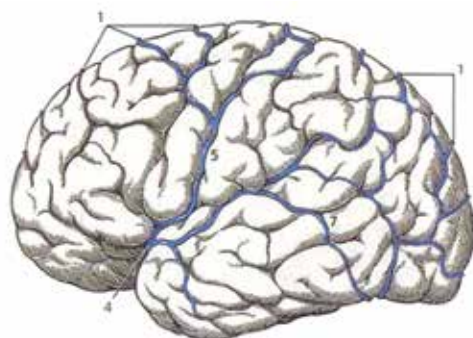
6-16 Artères de la face médiale de l'encéphale



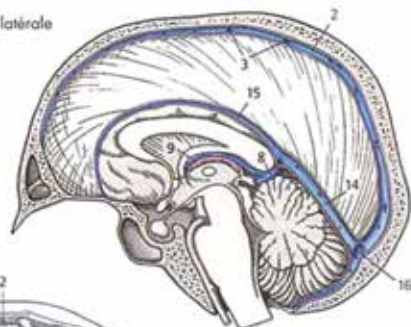
Artères de la face latérale des hémisphères cérébraux

6-18 Artères de la face latérale de l'encéphale

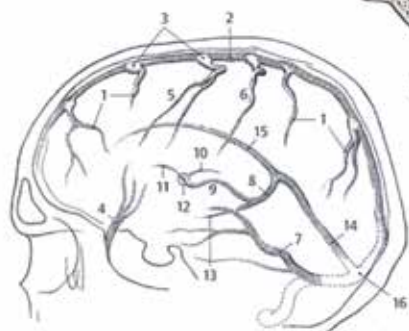




A Veines de l'encéphale, face latérale de l'hémisphère

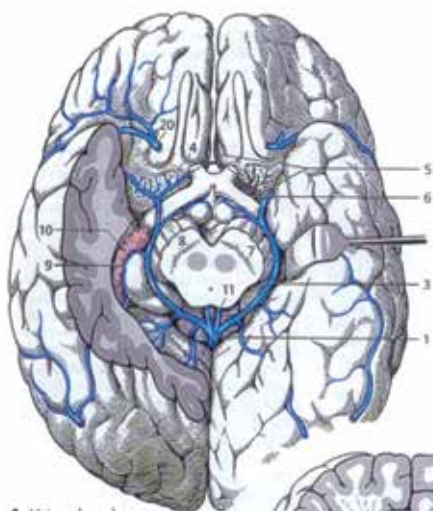


B Veines de l'encéphale, face médiale de l'hémisphère

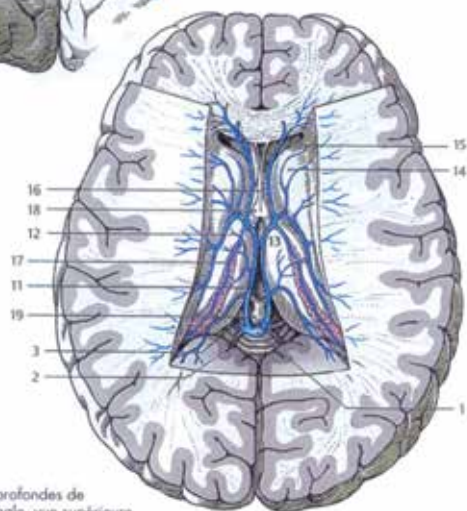


C Angiographie cérébrale, temps veineux (d'après Kroyenbühl et Richter)

- 1- Veines cérébrales superficielles supérieures
- 2- Sinus sagittal supérieur
- 3- Lacunes latérales
- 4- Veine cérébrale moyenne superficielle
- 5- Veine anastomotique supérieure de Trolard
- 6- Veine centrale de Rolando
- 7- Veine anastomotique inférieure de Labbé
- 8- Grande veine cérébrale de Galien
- 9- Veine cérébrale interne
- 10- Veine thalamostriée
- 11- Veine du septum pellucidum
- 12- Foramen interventriculaire de Monroe
- 13- Veine basale de Rosenthal
- 14- Sinus droit
- 15- Sinus sagittal inférieur
- 16- Confluent des sinus



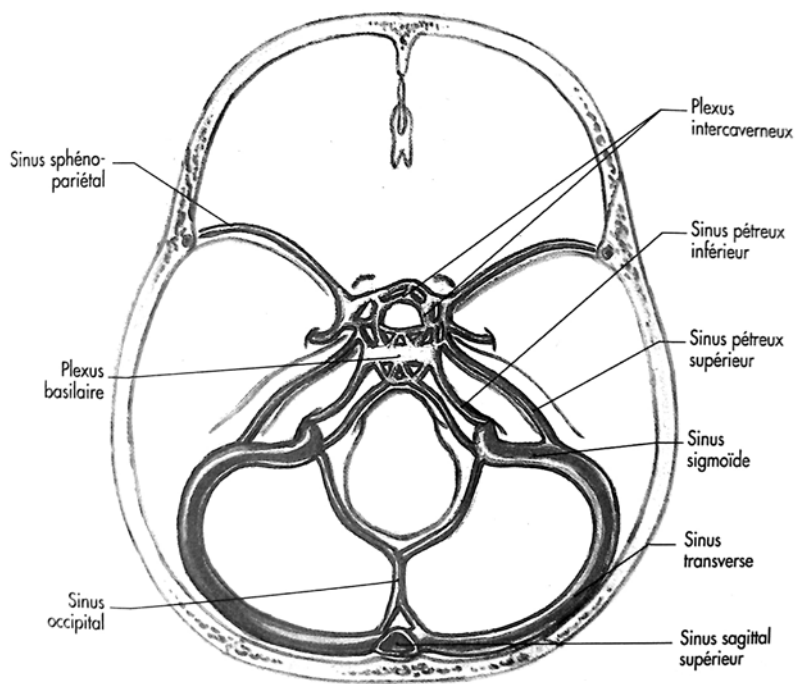
A Veines basales de l'encéphale



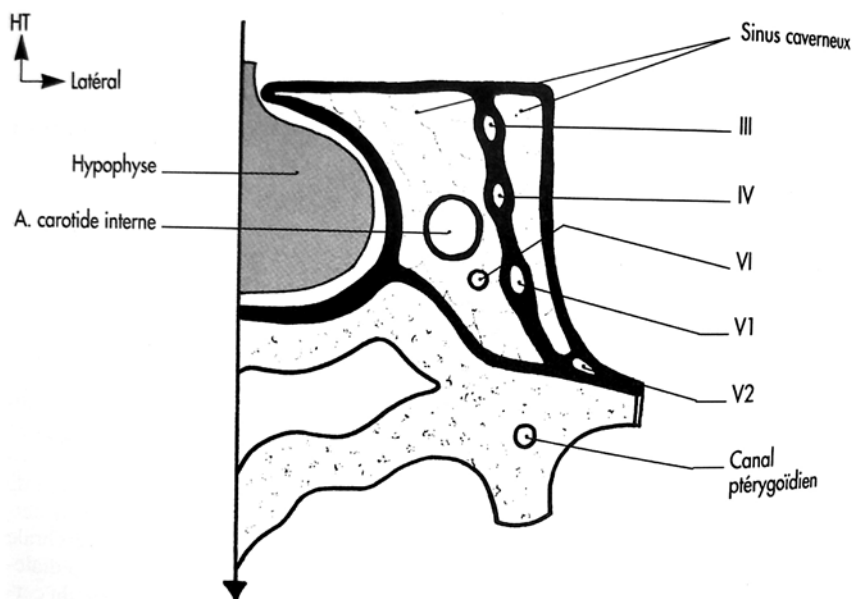
B Veines profondes de l'encéphale, vue supérieure

- 1- Grande veine cérébrale de Galien
- 2- Veine cérébelleuse vermiennne
- 3- Veine basale de Rosenthal
- 4- Substance perforée antérieure
- 5- Veine cérébrale antérieure
- 6- Veine cérébrale moyenne profonde
- 7- Pédoncule cérébral
- 8- Veine interpédonculaire
- 9- Veine choroïdienne inférieure
- 10- Plexus choroïde
- 11- Veine cérébrale interne
- 12- Veine thalamostriée
- 13- Thalamus
- 14- Noyau caudé
- 15- Veine du septum pellucidum
- 16- Septum pellucidum
- 17- Veine choroïdienne supérieure
- 18- Fornix
- 19- Épiphyse
- 20- Veine cérébrale moyenne superficielle

Sinus de la base du crâne, Vue supérieure



Sinus caverneux, coupe frontale



LA VOIE MOTRICE VOLONTAIRE

I- INTRODUCTION :

La motricité volontaire permet d'agir sur les muscles squelettiques sous le contrôle de la conscience, en synergie avec la sensibilité.

Cette motricité volontaire comprend deux grands systèmes : un système moteur latéral qui a pour cible les motoneurones innervants les muscles distaux (motricité distale, fine et précise) et un système médial qui a pour cible la musculature axiale (rôle dans la posture).

Le tractus corticospinal (voie pyramidale) et les fibres corticonucléaires sont considérés comme les voies de la motricité volontaire. C'est par leur intermédiaire que le cortex contrôle les centres moteurs sous-corticaux.

La voie corticospinale qui a pour cible les motoneurones spinaux, alors que la voie corticonucléaire qui a pour cible les noyaux moteurs des nerfs crâniens.

II- TRACTUS CORTICOSPINAL :

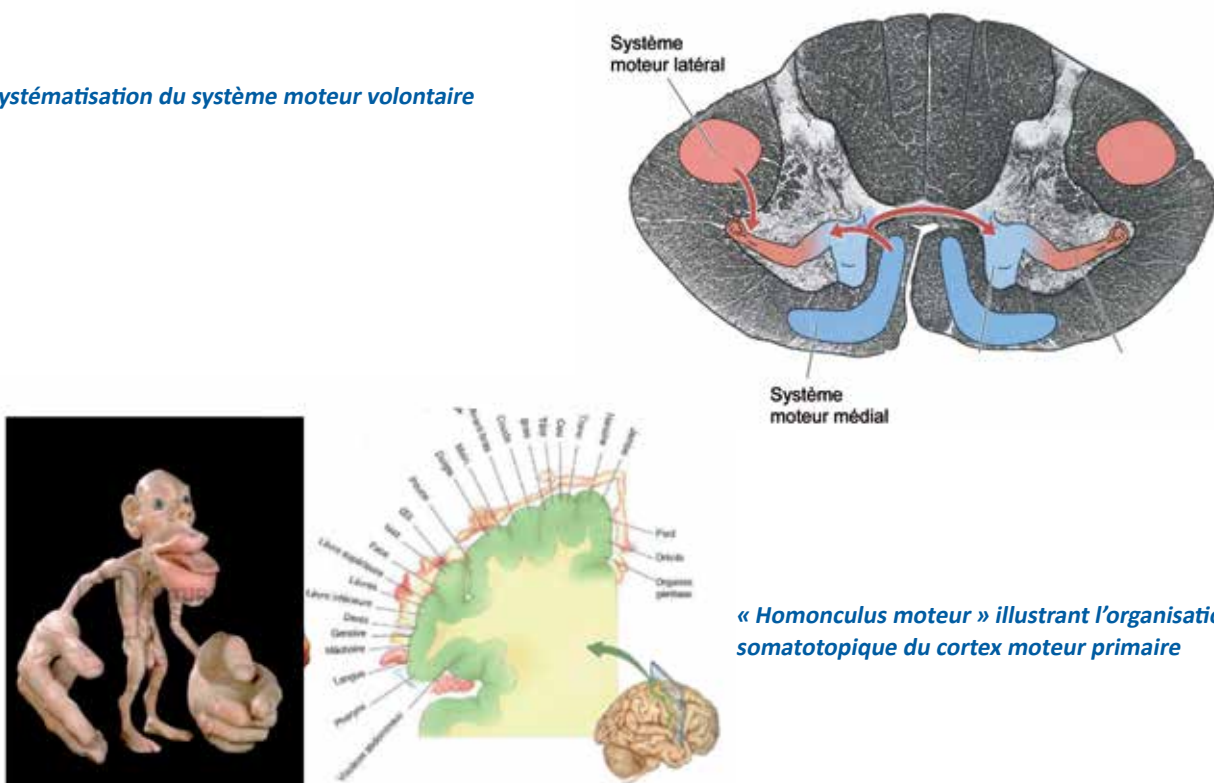
1- ORIGINE :

Cette voie est constituée de 1 à 2 millions de fibres. Son origine corticale est assez large. Classiquement, elle naît du cortex moteur primaire, mais plus précisément les fibres pyramidales prennent leur origine dans : les aires précentrales (4 et 6 de Brodmann), les aires du lobe pariétal (aires 3, 1 et 2) et la deuxième région sensori-motrice (aire 40).

Approximativement 2/3 des fibres sont issues de la région précentrale et 1/3 du lobe pariétal. Parmi ces fibres seules 60% sont myélinisées. Les grosses fibres des cellules pyramidales de Betz de l'aire 4 ne constituent que 2 à 3 % des fibres myélinisées.

Le corps humain est représenté sur le cortex central de façon somatotopique (homonculus). La surface corticale est fonction de l'importance fonctionnelle de la région. On reconnaît ventro-dorsalement la représentation de la main, de l'avant-bras, du bras, du tronc (sur la face latérale) et la représentation du pied, de la jambe et de la cuisse sur la partie médiale (lobule paracentral).

Systématisation du système moteur volontaire



« **Homonculus moteur** » illustrant l'organisation somatotopique du cortex moteur primaire

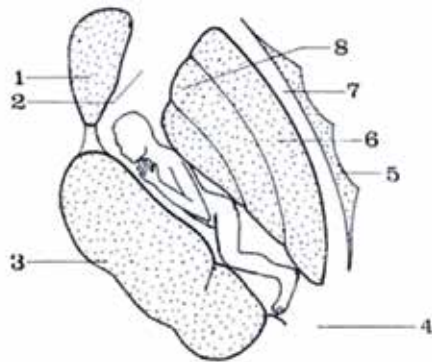
2- TRAJET :

Les fibres de la voie pyramidale traversent successivement le centre ovale (participant à la constitution de la couronne rayonnante) et la capsule interne au niveau de son segment postérieur.

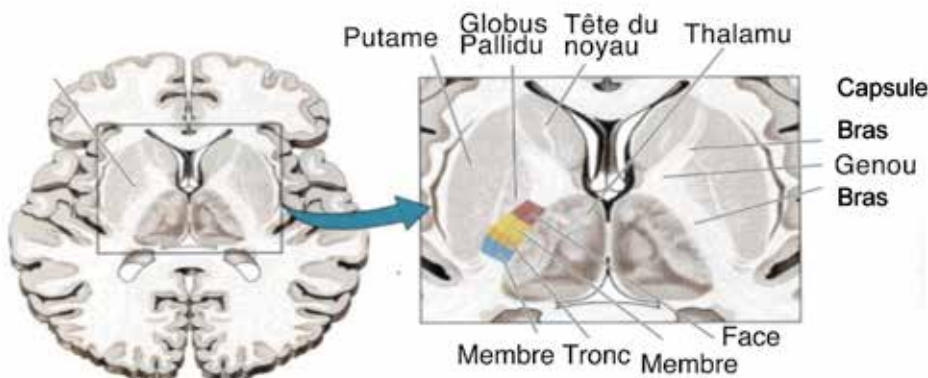
Dans la région du genou de la capsule interne se trouvent les fibres corticonucléaires pour l'innervation des noyaux moteurs des nerfs crâniens, d'où le nom de faisceau géniculé.

Les fibres du tractus corticospinal traversent le bras postérieur suivant une organisation somatotopique : membre thoracique ou supérieur rostralement, tronc au milieu et membre pelvien ou inférieur caudalement.

Coupe horizontale de la capsule interne montrant la systématisation motrice



1. Noyau caudé
2. Bras antérieur
3. Thalamus
4. Segment rétro-lenticulaire
5. Claustrum
6. Putamen
7. Capsule externe



Le tractus pyramidal descend ensuite dans le tronc cérébral. À l'étage mésencéphalique, il est situé dans le pied des pédoncules cérébraux. À l'étage du pont, les fibres sont dissociées par les noyaux du pont. À l'étage bulbaire, il forme les pyramides (d'où l'appellation de faisceau pyramidal).

Juste au-dessus de la jonction bulbo-médullaire, environ 80% des fibres pyramidales croisent la ligne médiane réalisant la décussation pyramidale. Ce faisceau corticospinal croisé descend dans le cordon latéral de la moelle spinale.

Les fibres n'ayant pas croisé la ligne médiane continuent leur trajet au sein du tractus corticospinal ventral et croisent vers le côté opposé à hauteur de leur terminaison.

3- TERMINAISON :

Le faisceau corticospinal se termine à tous les étages de la moelle spinale sur les motoneurones de la corne ventral.

III- TRACTUS CORTICONUCLÉAIRE :

Ce faisceau est destiné aux motoneurones des nerfs crâniens.

1- ORIGINE :

Il naît de la face latérale du gyrus précentral au niveau de sa partie inférieure (opercule rolandique).

2- TRAJET :

Il accompagne le faisceau corticospinal et traverse le genou de la capsule interne, puis il descend dans le pied des pédoncules cérébraux en position médiale par rapport au faisceau pyramidal.

3- TERMINAISON :

Le faisceau corticonucléaire se termine controlatéralement sur le noyau moteur du V, sur le noyau inférieur du VII et sur les noyaux du XI et XII et bilatéralement sur les noyaux du VII supérieur du IX et du X.

A- DANS LE MÉSENCÉPHALE :

Il se termine au niveau des noyaux du III (oculomoteur) et du IV (pathétique ou trocléaire).

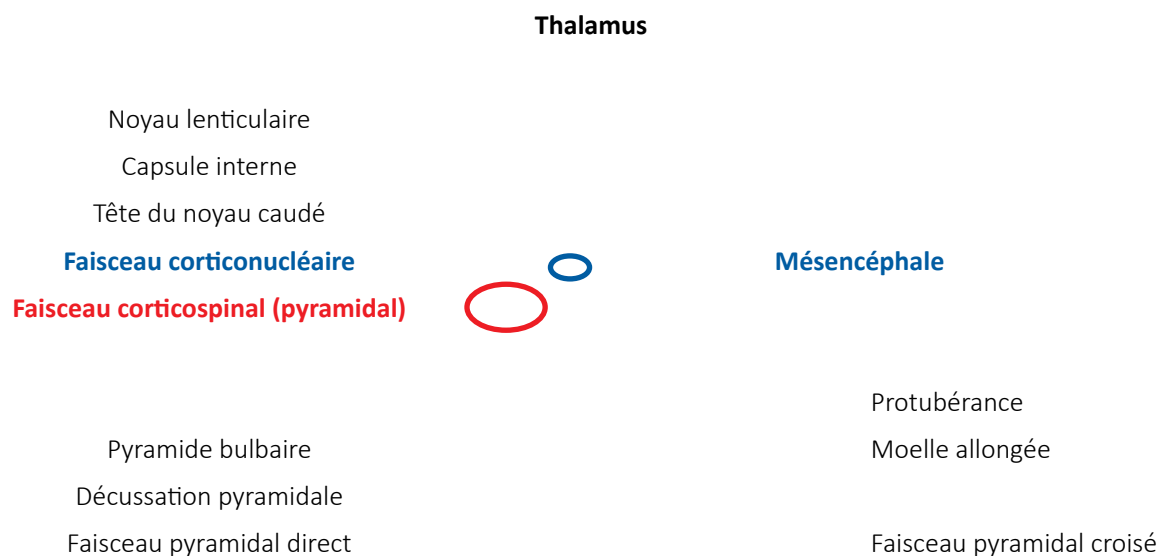
B- DANS LA PROTUBÉRANCE :

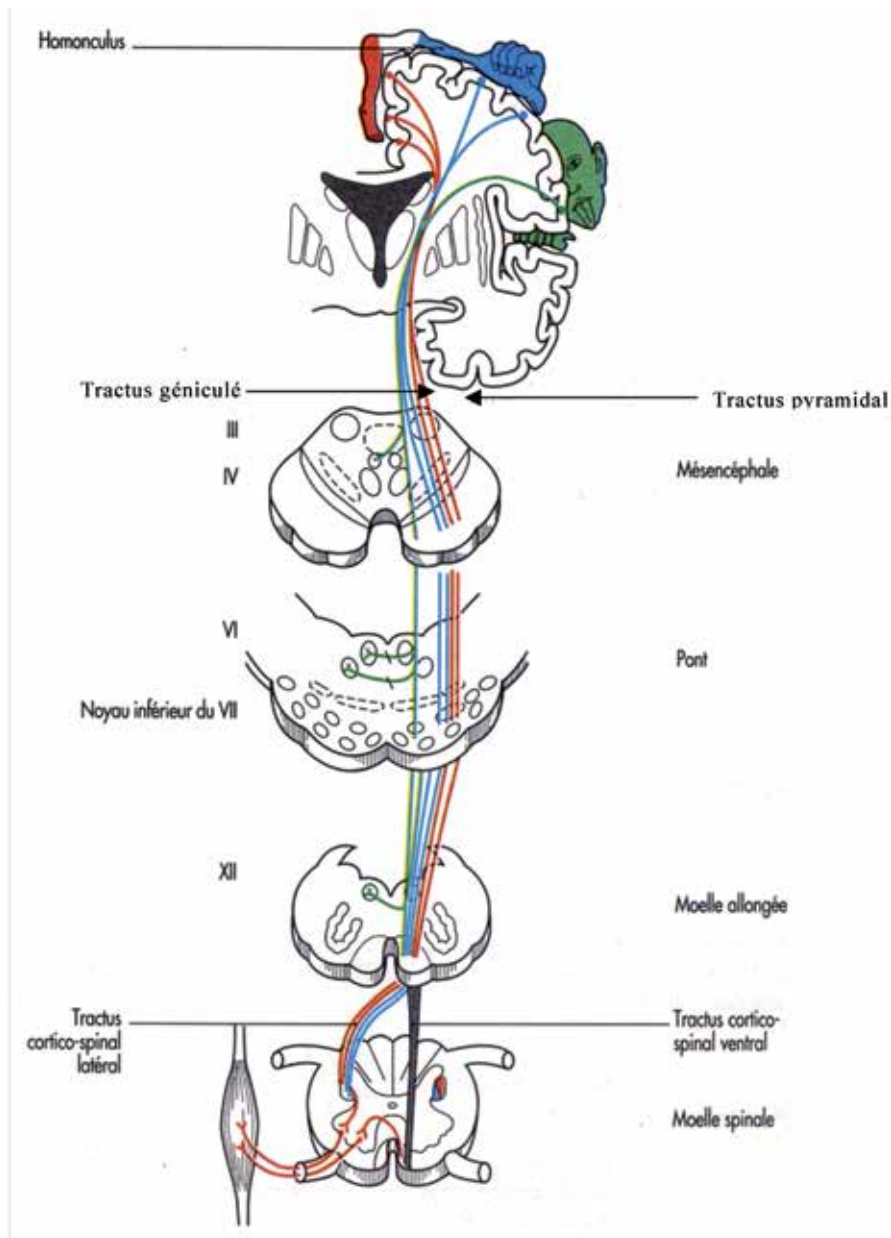
Il se termine au niveau du :

- noyau moteur du V (trijumeau) : mastication.
- noyau du VI (abducens ou moteur oculaire externe)
- noyaux du VII (facial) : motricité de la face.

C- DANS LE BULBE :

Il se termine au niveau des noyaux des nerfs mixtes IX, X, XI (glosso-pharyngien, vage, accessoire) impliqués dans la sensibilité et motricité du carrefour pharyngolaryngé (déglutition, phonation, sécrétion salivaire...) et du XII (grand hypoglosse).





LES VOIES DE LA SENSIBILITÉ

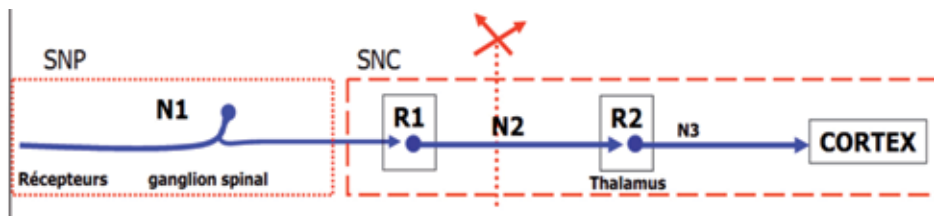
I- INTRODUCTION :

La sensibilité (ou somesthésie) est une fonction cérébrale qui assure la réception et le traitement de stimuli externes et internes. Elle participe au maintien de l'éveil et à la régulation de la motricité.

La somesthésie regroupe des sensations d'origine différentes : les sensations issues de la surface cutanée que l'on appelle **l'extéroception**, celles qui renseignent sur la position du corps dans l'espace et des segments du corps les uns par rapport aux autres, **la proprioception** celles issues des organes internes, **l'intéroception**.

Elle recouvre deux domaines : la sensibilité somatique, consciente, traite les informations cutanées, superficielles et les stimuli profonds issus des muscles, tendons et articulations et la sensibilité végétative, inconsciente, véhicule des informations issues des organes profonds.

Les voies ascendantes de la sensibilité sont des voies à **trois neurones** : le premier neurone (ou protoneurone) a son corps cellulaire dans le ganglion spinal. Le deuxième neurone (ou deutoneurone) croise la ligne médiane pour atteindre le thalamus controlatéral. Le troisième neurone est thalamo-cortical.



On peut décrire ses voies en fonction du type de sensibilité qu'elles véhiculent, on distingue ainsi :

- Les voies de la sensibilité superficielle ou extéroceptive, à point de départ cutané, véhiculant vers le cortex le tact (épicrotique ou protopathique) et la sensibilité thermoalgique.
- Les voies de la sensibilité profonde ou proprioceptive, parties des muscles, des tendons et des articulations, elles aboutissent soit au cortex encéphalique (sensibilité profonde consciente), soit au cortex cérébelleux (sensibilité profonde inconsciente). Les voies de la sensibilité proprioceptive inconsciente sont étudiées avec le cervelet.

II- VOIES DE LA SENSIBILITÉ TACTILE ÉPICRITIQUE ET PROPRIOCEPTIVE CONSCIENTE :

La voie de la sensibilité proprioceptive ou profonde transmet en permanence au centre nerveux la position des différents segments des membres dans l'espace.

La voie **lemniscale** est aussi appelée système **cordonal postérieur**, car elle emprunte les cordons postérieurs de la moelle ou colonnes dorsales. Elle véhicule des informations fournies par des mécanorécepteurs encapsulés. Les récepteurs spécifiques se trouvent en profondeur du corps sur les structures para articulaire (capsule articulaire, tendon, muscle, ligament, périoste).

Le tact épicrotique est une modalité rapide, précise et discriminative. C'est une voie très rapide à 3 neurones qui présente une somatotopie très précise et suit exactement la voie cordonale postérieure (sensibilité profonde consciente).

1- PREMIER NEURONE (PROTONEURONE) :

Les fibres nerveuses, véhiculant les influx des sensations tactiles épicrotique, vibratoire et articulaire sont de gros calibres et fortement myélinisées. Leur corps cellulaire se trouve dans les ganglions spinaux et dans le ganglion trigéminal de Gasser pour les fibres sensibles de la face et des sinus.

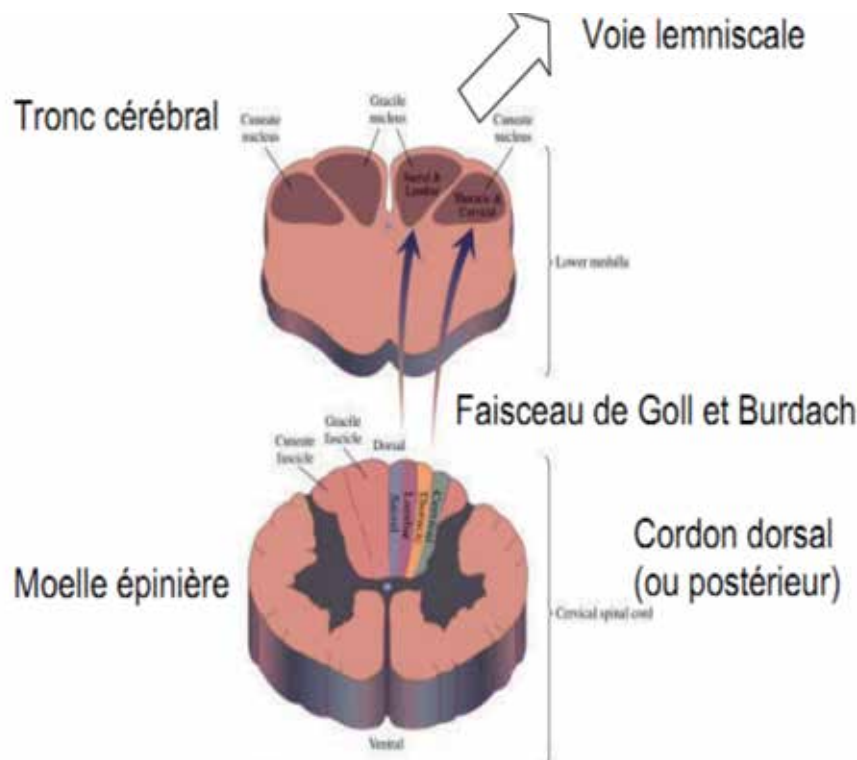
Pour un nerf rachidien, le corps cellulaire situé au niveau du ganglion spinal présente un prolongement périphérique (dendrite) qui se termine au contact de récepteur spécifique.

Les prolongements centripètes (axones) des protoneurones entrent dans la moelle spinale par la racine dorsale (où elles ont une situation médiale) sans y faire de relais et passent dans les cordons dorsaux ou postérieurs, où les fibres entrantes s'accrochent latéralement aux fibres déjà présentes, de sorte que les fibres sacrales et lombales soient en position médiale par rapport aux fibres thoraciques et cervicales plus latérales.

Les faisceaux sacraux, lombaux et thoraciques forment alors le tractus gracile de Goll, tandis que les faisceaux cervicaux constituent le tractus cunéiforme de Burdach.

Ainsi, le cordon postérieur de la moelle épinière est organisé selon une somatotopie très précise : le faisceau gracile véhicule les informations des membres inférieurs jusqu'au T6 alors que le faisceau cunéiforme véhicule les informations du tronc au-dessus de T6, des membres et de la nuque.

Ces voies font relais dans les noyaux gracile et cunéiforme de la moelle allongée. **Ces noyaux assurent un traitement de l'information sensitive permettant d'augmenter le contraste et la résolution spatiale du système.**



2- DEUXIÈME NEURONE (DEUTONEURONE) :

Il est représenté par les cellules des noyaux de Goll et de Burdach. Les fibres secondaires ou deutoneurones qui remontent de ces noyaux forment le lemnie médial (Ruban de Reil median).

Au niveau du bulbe, elles croisent la ligne médiane à hauteur de l'obex, plus haut que la décussation motrice, en formant la décussation sensitive ou lemniscale, de sorte que les fibres issues du noyau gracile prennent une position ventrale et ceux issus du noyau cunéiforme une position dorsale.

Au niveau du pont, les fibres graciles adoptent une position latérale et les fibres cunéiformes une position latérale.

À ce niveau elles sont rejointes par les fibres issues des noyaux du trijumeau, constituant le lemniscus trigéminale, qui va se disposer à la face dorsomédiale du lemniscus médial.

La voie lemniscale reste en position paramédiane. Elle forme le lemniscus médian, qui traverse le tegmentum des trois étages du tronc cérébral. Au niveau du mésencéphale, cette voie est refoulée latéralement par le noyau rouge.

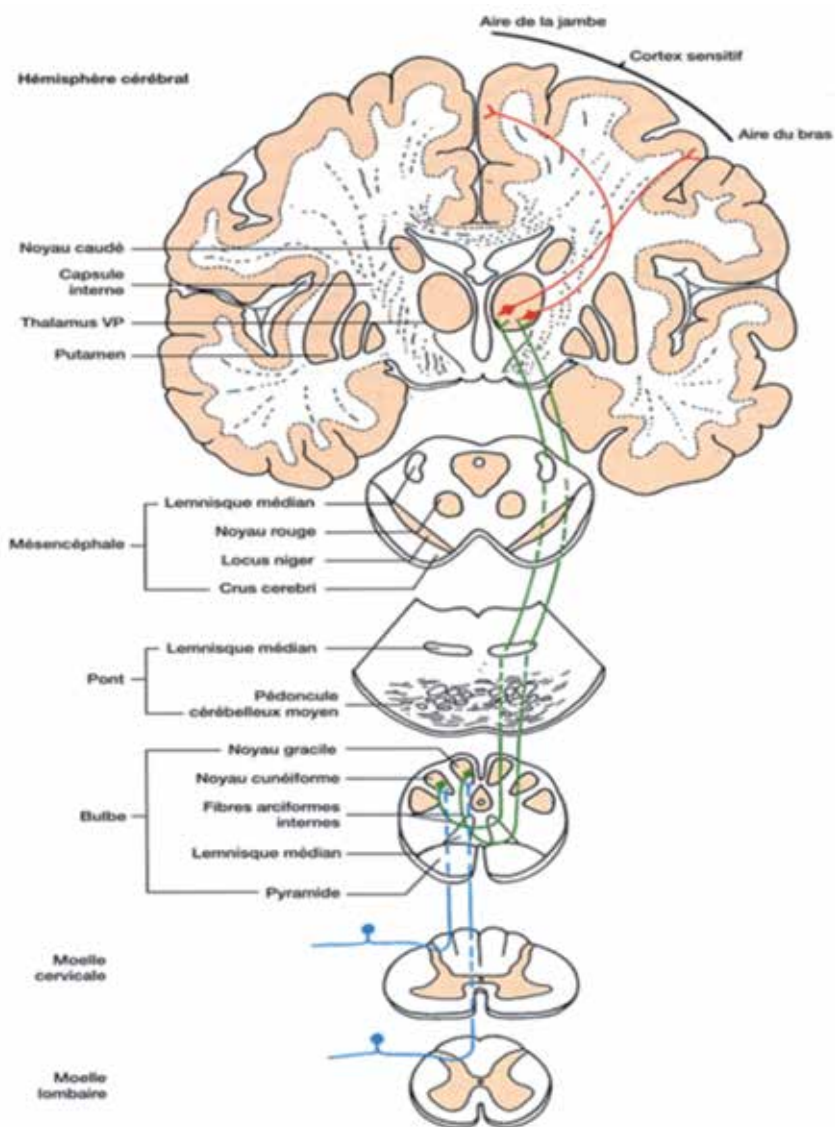
Ces fibres vont se diriger vers le thalamus pour réaliser un deuxième relais au niveau d'un noyau du groupe latéral de ce dernier : le noyau Ventral Postérieur Latéral (VPL). La terminaison à ce niveau est organisée selon la modalité sensitive et selon une somatotopie. Les informations du membre inférieur se projettent en dehors puis plus en dedans, celles du tronc, du membre supérieur et du cou. Il joue un rôle dans la discrimination sensitive.

Les informations sensibles de la face se projettent plus en dedans, dans le noyau Ventral Postérieur Médial (VPM).

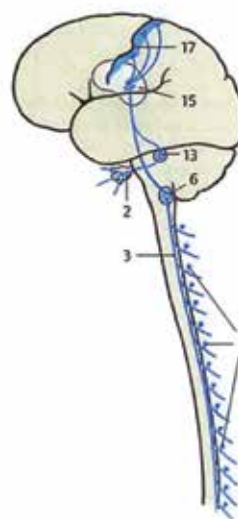
3- TROISIÈME NEURONE :

C'est le neurone terminal ou thalamo-cortical. Le corps cellulaire se trouve au niveau du noyau ventral postéro-latéral du thalamus dont les axones traversent le segment postérieur de la capsule interne, le centre ovale et se projettent sur le cortex sensitif primaire (aires corticales 3, 1 et 2) de la circonvolution pariétale ascendante (gyrus post-central).

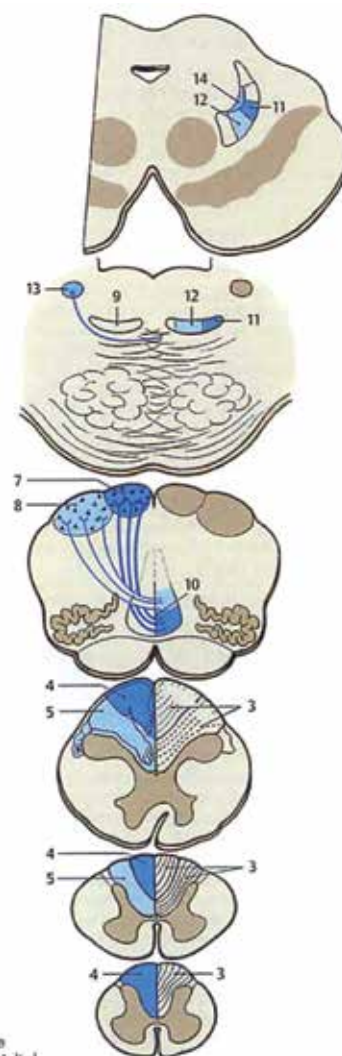
Cette terminaison se fait selon une somatotopie très précise (homunculus sensitif) : la face externe de la circonvolution reçoit de bas en haut les informations sensibles de la face, puis de la main, avant-bras, bras et tronc de l'hémicorps opposé (territoire brachio-facial). Ce territoire est vascularisé par les branches de l'artère cérébrale moyenne.



1. Ganglions spinaux
2. Ganglion de Gasser
3. Cordons postérieurs
4. Tractus gracile de Goll
5. Tractus cunéiforme de Burdach
6. Noyaux du cordon postérieur
7. Noyau gracile de Goll
8. Noyau cunéiforme de Burdach
9. Lemniscus médial
10. Décussation lemniscale
11. Fibres issues du noyau gracile
12. Fibres issues du noyau cunéiforme
13. Noyau du trijumeau



A Voie de la sensibilité tactile



B Situation de la voie cordonale postérieure et du lemniscus médial

Cortex somesthésique

Corps calleux

Capsule interne

Sillon latéral (scissure de Sylvius)

Noyau ventral postéro-latéral du thalamus

Tegmentum mésencéphalique

Noyau rouge

Quatrième ventricule

Pont

Lemnisque médial

Noyau gracile

Noyau cunéiforme

Pyramide bulbaire

Nerf spinal cervical

Nerf spinal thoracique

Cordon postérieur

Nerf spinal lombaire

Corne antérieure (ventrale)

III- VOIES DU TACT PROTOPATHIQUE ET DE LA SENSIBILITÉ THERMO-ALGÉSIQUE :

Ces voies spinothalamiques appartiennent au système extra-lemniscal. Les fibres peu ou non myélinisées, de petit calibre, la vitesse de conduction est donc plus lente. C'est un système moins précis.

La nociception (perception de la douleur) et la thermoception (perception non douloureuse de la température) ont leurs propres récepteurs qui diffèrent des mécanorécepteurs. Ces informations nociceptives et thermoceptives sont acheminées par une voie différente jusqu'au cortex somatosensoriel : la voie spinothalamique.

Dans cette voie spinothalamique chemine la sensibilité tactile protopathique ou tact grossier qui donne une précision sur la nature et sur la topographie de la stimulation et la sensibilité thermo-algésique qui permet la transmission de la sensibilité au froid, au chaud et à la douleur.

Ce système extra-lemniscal peut être divisé en deux voies : la voie spinothalamique proprement dite qui véhicule le tact protopathique et la voie spino-réticulaire ou spino-réticulo-thalamique qui véhicule la sensibilité thermoalgique, caractérisée par la diffusion de l'information via la substance réticulée.

1- PREMIER NEURONE :

Les fines fibres nerveuses véhiculant les sensations de douleur et de température, peu ou pas myélinisées, ont leurs corps cellulaires dans le ganglion spinal.

Leurs prolongements centripètes atteignent la moelle spinale par la partie latérale de la racine dorsale, et se terminent dans la corne dorsale où elles font relais avec les deutoneurons.

2- DEUXIÈME NEURONE :

Les axones de ces derniers croisent la ligne médiane en avant du canal central et montent dans le cordon ventro-latéral constituant le faisceau spinothalamique latéral.

Ces fibres montent alors dans la moelle spinale selon une disposition particulière de sorte que les fibres sacrées sont le plus latérales (les afférences les plus caudales des membres inférieurs sont plus antérolatérales) et les fibres cervicales sont les plus médiales.

Dans la moelle allongée, le tractus spinothalamique latéral est situé au niveau du bord latéral en arrière de l'olive bulbaire, et abandonne de nombreuses collatérales à la formation réticulaire.

Le faisceau spinothalamique ventral remonte le long de la moelle épinière, 80 à 80% de ses fibres s'arrêtent en faisant synapse au niveau de la substance réticulée du tronc cérébral, et 10 à 20% des fibres restantes atteignent le noyau post du thalamus de façon diffuse.

La formation réticulaire est un élément du système activateur ascendant, dont l'excitation provoque l'éveil de l'organisme. Les influx véhiculés par la voie de la douleur conduisent ainsi non seulement à une sensation consciente, mais aussi à une augmentation de l'attention par l'intermédiaire de la formation réticulaire. À l'opposé les voies de la sensibilité épicrotique traversent le tronc cérébral sans émettre de collatérales.

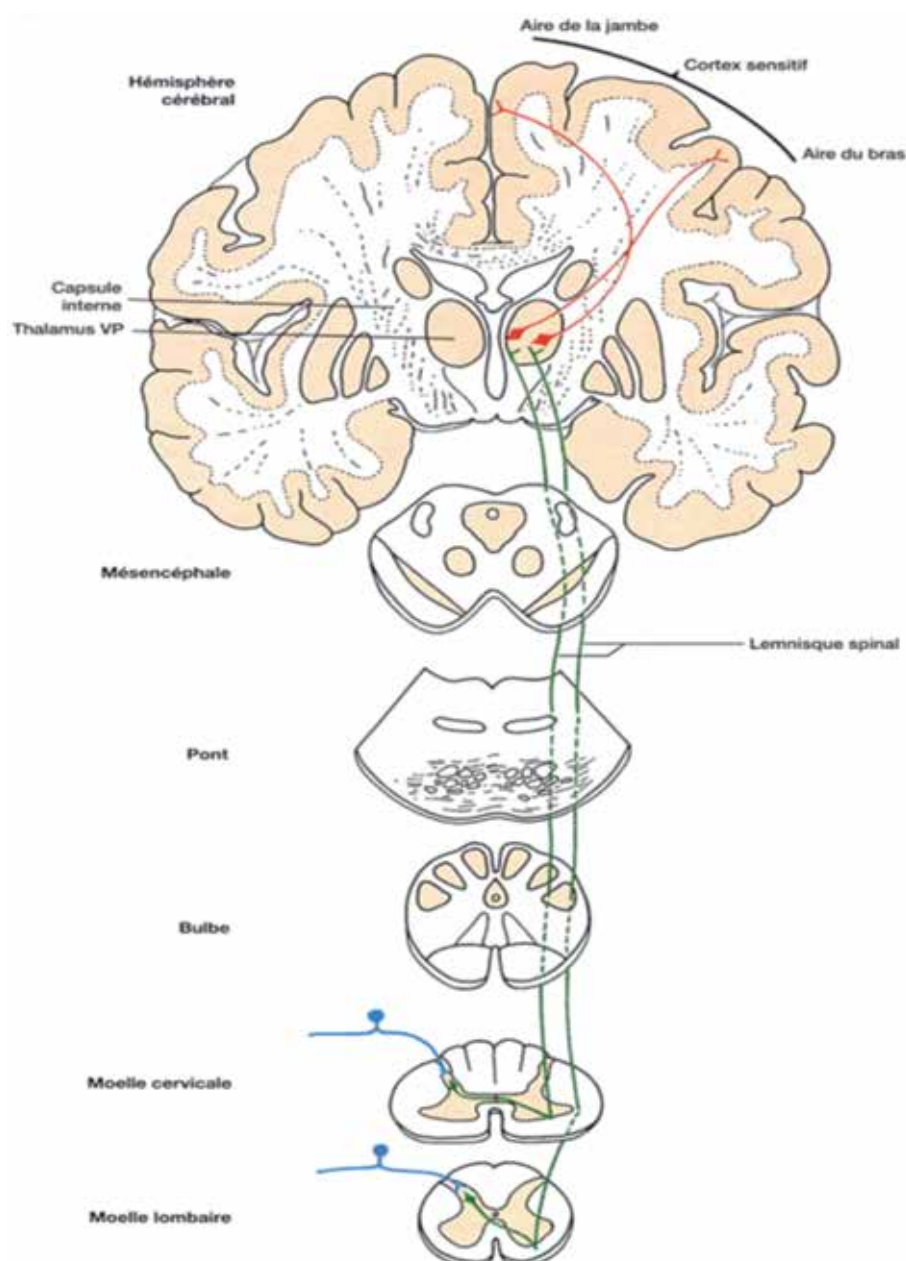
Les fibres spinothalamiques rejoignent le lemnius médial au niveau du mésencéphale, en position dorsolatérale ; elles font relais dans le noyau ventral postéro-latéral du thalamus.

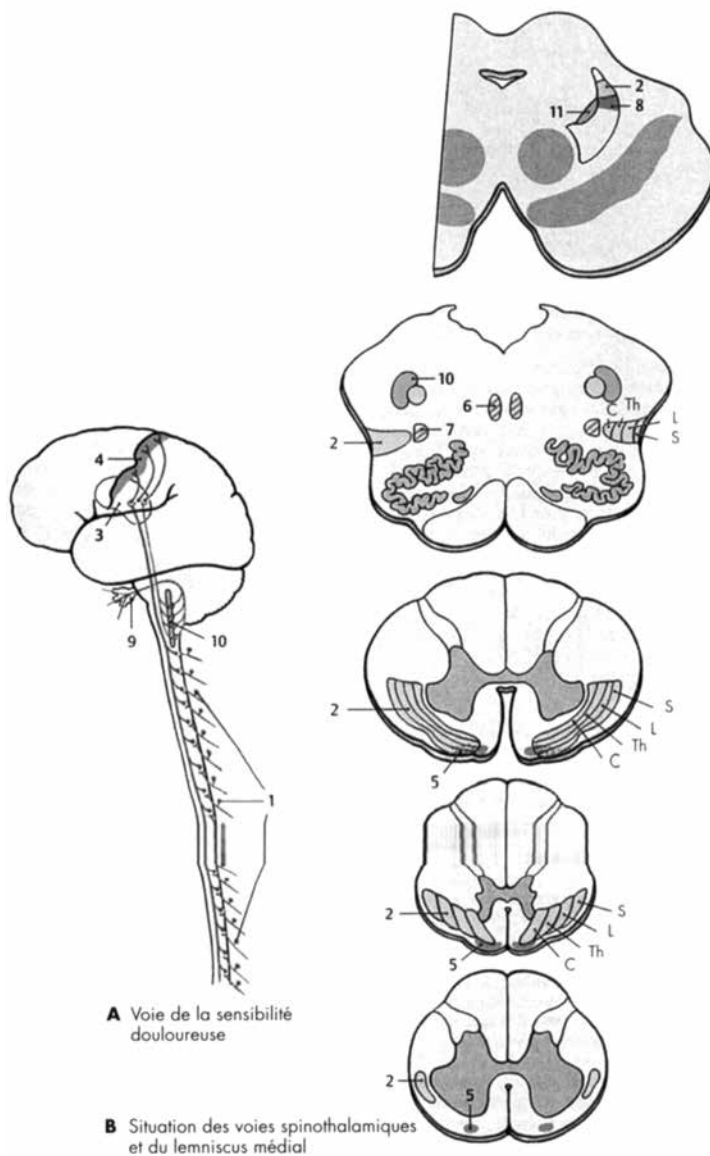
3- TROISIÈME NEURONE :

Le corps cellulaire se trouve au niveau du noyau ventral postéro-latéral du thalamus dont les axones se projettent sur la circonvolution pariétale ascendante (aire somesthésique primaire, aire de Brodmann : 3 a, 3 b, 1, 2) selon une somatotopie très précise.

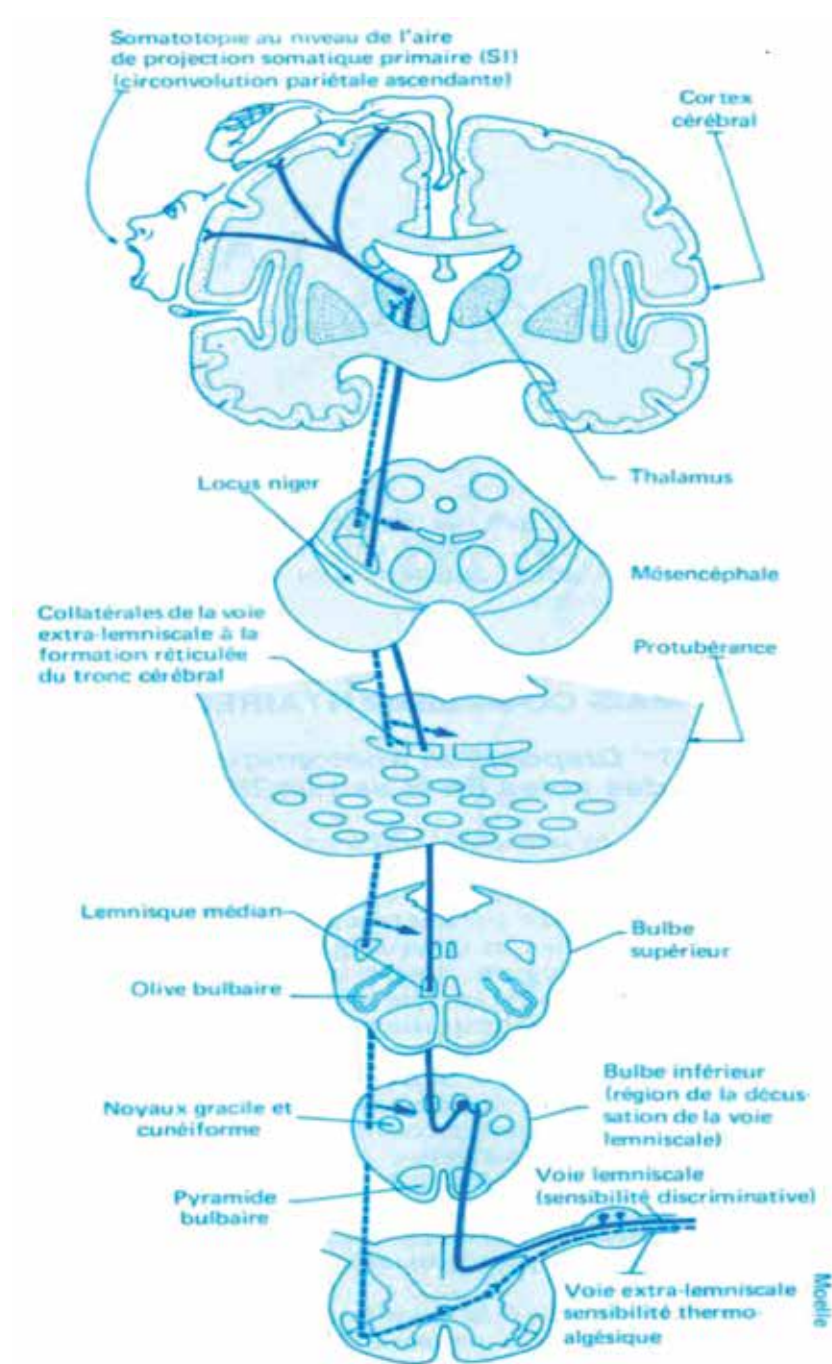
4- SENSIBILITÉ DE LA FACE :

Les fibres véhiculant la sensibilité thermoalgique de la face, issues du ganglion trigéminal de Gasser, se terminent dans le noyau spinal du nerf trijumeau. Les fibres conduisant la douleur se situeraient latéralement, celles véhiculant la température plus médialement. Les fibres trigéminaux secondaires rejoignent ensuite le lemnius médial.





1. Ganglions spinaux
2. Tractus spinothalamique latéral
3. Noyau ventral postérieur du thalamus
4. Gyrus postcentral
5. Tractus spinothalamique antérieur
6. Lemniscus médial
7. Olive bulbaire
8. Lemniscus médial
9. Ganglion de Gasser
10. Noyau spinal du trijumeau
11. Fibres trigéminal



PCEM2

THEME XI PHYSIOLOGIE

TRANSMISSION SYNAPTIQUE ET NEUROTRANSMETTEURS

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. Enumérez les caractéristiques d'une synapse électrique et d'une synapse chimique.
2. Identifier les critères fonctionnels d'une synapse chimique.
3. Expliquer le rôle du calcium dans la libération du neuromédiateur.
4. Expliquer les mécanismes de la transmission synaptique chimique.
5. Expliquer le fonctionnement de la plaque motrice.
6. Expliquer les mécanismes de la transmission synaptique au niveau des synapses neuro-neuro-niques.
7. Expliquer les mécanismes intervenants dans l'intégration de l'information neuronale.
8. Citer les différentes caractéristiques des neuro-transmetteurs et des neuromodulateur

PLAN

1. INTRODUCTION

- 1.1 SYNAPSE ÉLECTRIQUE
- 1.2 SYNAPSE CHIMIQUE

2- CRITÈRES FONCTIONNELS D'UNE SYNAPSE CHIMIQUE

- 2.1- Biosynthèse du neuro-médiateur
- 2.2- Libération des neurotransmetteurs
- 2.3- Notion de libération quantique
- 2.4- Inactivation des neuromédiateurs

3. MÉCANISMES IONIQUES DE LA TRANSMISSION SYNAPTIQUE CHIMIQUE

- 1- Classification des récepteurs
- 2- Transmission synaptique au niveau des récepteurs couplés à un canal
- 3- Transmission synaptique au niveau des récepteurs couplés à une protéine G

4. TRANSMISSION SYNAPTIQUE AU NIVEAU DE LA PLAQUE MOTRICE

5. MÉCANISMES POST-SYNAPTIQUES DE LA TRANSMISSION DANS LE SYSTÈME NERVEUX CENTRAL

- 5.1 Synapses excitatrices
- 5.2 Synapses inhibitrices

6. ASPECTS NEUROCHIMIQUES DE LA COMMUNICATION INTERNEURALE

- 6.1 Mécanismes intervenants dans l'intégration de l'information neuronale
- 6.2 Coexistence de plusieurs neuromédiateurs dans le même neurone

7. LES NEUROMÉDIATEURS

- 7.1 Les médiateurs de faible poids moléculaire
- 7.2 Les neuropeptides

8. NEUROTRANSMISSION ET NEUROMODULATION

- 8.1 Les neurotransmetteurs
- 8.2 Les neuromodulateurs

1- INTRODUCTION

Le système nerveux est constitué d'entités cellulaires distinctes, les neurones. Ces neurones possèdent une activité électrique complexe et sont capables de donner naissance à des potentiels d'action qui se propagent. Ces signaux nerveux ou influx nerveux sont transmis d'un neurone à l'autre à travers des jonctions interneuronales appelées synapses.

La synapse est une région de contact entre 2 neurones ou entre un neurone et un muscle, où apparaissent des différenciations anatomofonctionnelles permettant des échanges d'informations.

Le nombre de synapses dans le cerveau humain est de l'ordre de 10^{15} avec un nombre de neurones de l'ordre de 10^{12} . Un neurone moyen établit au moins 1000 synapses avec d'autres neurones et reçoit un nombre encore plus grand de synapses provenant d'autres neurones.

1.1. SYNAPSE CHIMIQUE

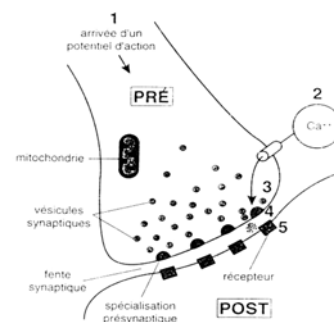
Ces synapses sont caractérisées par :

- a- Un espace synaptique important (30 à 50 nm).
- b- La libération d'un médiateur chimique.
- c- Un délai synaptique important (0,5 à 5 ms) dû au temps mis par les processus suivants :

- sécrétion du neuromédiateur dans l'élément présynaptique
- ouverture des canaux calcium voltage dépendants
- diffusion du médiateur dans l'espace synaptique,
- liaison du neuromédiateur à son récepteur
- création du potentiel d'action le potentiel d'action.

La transmission de l'influx nerveux se fait de manière unidirectionnelle : de l'élément pré synaptique à l'élément post synaptique.

Figure 1.
Synapse chimique



2. CRITÈRES FONCTIONNELS D'UNE SYNAPSE CHIMIQUE

2.1- BIOSYNTÈSE DU NEURO-MEDIATEUR

La synthèse des neuromédiateurs a lieu, dans les terminaisons axoniques de l'élément présynaptique, à partir de précurseurs métaboliques. Cette synthèse fait appel dans la plupart des cas à des enzymes spécifiques produits exclusivement dans le corps cellulaire et transportés au niveau des terminaisons par des mécanismes de flux axonal.

2.2 LIBÉRATION DES NEUROTRANSMETTEURS

A. RÔLE DU Na^+ ET DU K^+

C'est l'arrivée du potentiel d'action au niveau de la terminaison axonale qui déclenche la libération du neurotransmetteur à partir de ces sites de stockage. Il a été démontré expérimentalement que ni le Na^+ ni le K^+ passant par les canaux voltage-dépendants responsables du potentiel d'action, ne sont impliqués dans la libération du neurotransmetteur. En effet, le blocage des canaux Na^+ et K^+ voltage-dépendants des terminaisons présynaptiques par la tétródotoxine (TTX) pour le Na^+ et le tétraéthylammonium (TEA) pour le K^+ , affecte le potentiel d'action présynaptique ainsi que le potentiel post synaptique. Mais le blocage des canaux Na^+ et K^+ n'affecte pas la capacité de libération du médiateur chimique. En effet, le potentiel post synaptique peut toujours être produit par l'injection de courant de dépolarisation au niveau présynaptique.

B. RÔLE DU CALCIUM

Le calcium est indispensable à la libération du médiateur chimique. La diminution de la $[Ca^{++}]$ extracellulaire diminue et bloque même la transmission synaptique. À l'inverse, l'augmentation du $[Ca^{++}]$ extracellulaire potentialise la libération du neuromédiateur. Lorsque le potentiel d'action arrive au niveau du bouton synaptique, il dépolarise ces terminaisons, et ouvre les canaux Ca^{++} entraînant l'entrée du Ca^{++} . L'augmentation $[Ca^{++}]$ i entraîne l'activation de certaines protéines contractiles (calmoduline...) qui vont pousser les vésicules contenant le neuromédiateur vers le face interne du bouton synaptique et entraîner le phénomène d'exocytose.

C. LIBÉRATION QUANTIQUE

Le médiateur chimique est libéré sous forme de paquets nommés quanta. Ce type de libération quantique existe dans toutes les synapses. Chaque quantum donne naissance à un potentiel local appelé potentiel synaptique miniature. chaque potentiel d'action (PA) libère environ :

- 200 quanta dans le cas de la synapse nerf-muscle.
- 1 à 10 quanta dans tous les autres cas.

Le taux de Ca^{++} affecte le nombre de quanta libérés plutôt que le nombre de molécules contenues dans chaque vésicule.

D. INTERACTION NEUROMÉDIATEUR & RÉCEPTEUR

Pour qu'il y ait transfert de l'information d'un neurone présynaptique à un autre neurone, il est nécessaire que le médiateur libéré interagisse le neurone post synaptique. Ce dernier doit donc posséder des sites de reconnaissance spécifiques au neuromédiateur : récepteurs.

E. INACTIVATION DES NEUROMÉDIATEURS

Pour que la synapse soit capable de transmettre une nouvelle information, il faut qu'elle retourne à l'état de repos, et donc que le neuromédiateur après avoir exercé son action soit éliminé de l'espace synaptique. En effet l'effet du neuromédiateur est limité par une inactivation enzymatique, la recapture par l'élément pré synaptique ou diffusion en dehors de la fente synaptique.

3. MÉCANISMES IONIQUES DE LA TRANSMISSION SYNAPTIQUE CHIMIQUE

3.1 CLASSIFICATION DES RÉCEPTEURS SELON LEUR LOCALISATION

En fonction de leur localisation, ces récepteurs peuvent être classés en 2 catégories.

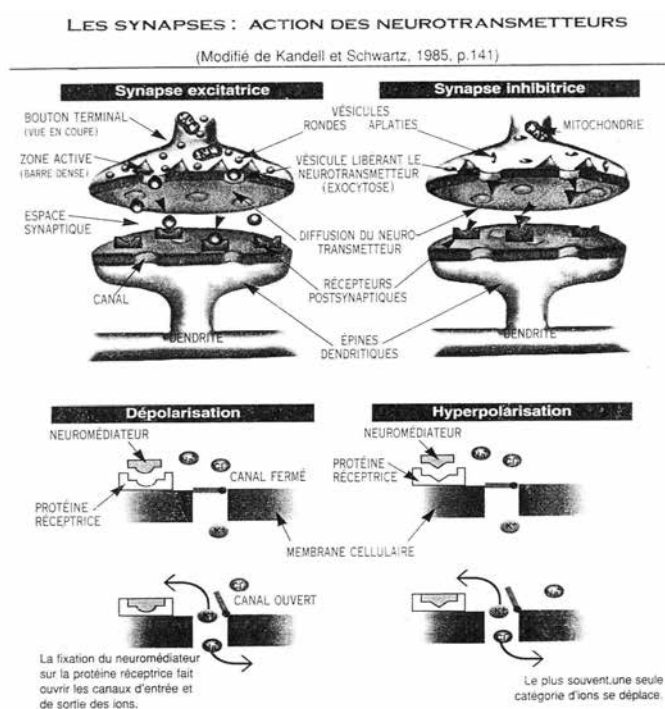
A. LES RÉCEPTEURS POST SYNAPTIQUES

Ils permettent la transmission de l'information du neurone présynaptique au neurone post synaptique. En effet, c'est le récepteur qui détermine la nature excitatrice ou inhibitrice d'une synapse. Ainsi, un neuromédiateur peut être excitateur sur une synapse et inhibiteur sur une autre en fonction de la nature du récepteur sur lequel il agit : dans les circuits nigrostriés (cours noyaux gris de la base) la dopamine est excitatrice si elle agit sur le récepteur D_1 et inhibitrice si elle agit sur le récepteur D_2 .

B. LES RÉCEPTEURS PRÉSYNAPTiques

Ils sont situés sur le versant présynaptique et modulent la libération des neuromédiateurs.

Figure. 2 : action des neurotransmetteurs



3.2 CLASSIFICATION STRUCTURALE DES RÉCEPTEURS

A. RÉCEPTEURS COUPLÉS À UN CANAL.

Le site de fixation du neuromédiateur et le canal ionique font partie d'un seul et même complexe protéique qui traverse la membrane. La fixation du neuromédiateur sur son site déclenche l'ouverture du canal ionique. Le récepteur canal le mieux connu actuellement est le récepteur nicotinique à l'acétylcholine ; ce récepteur n'est pas très sélectif, car il laisse pénétrer des ions Na^+ et K^+ .

Le récepteur du GABA est plus complexe, outre le site de fixation du neuromédiateur, il comprend un canal perméable aux ions Chlore, plus des sous-unités qui fixent des molécules comme les anxiolytiques (Valium).

Selon la nature et la direction du transfert ionique, la variation de potentiel électrique créée sera excitatrice ou inhibitrice. Ce type de récepteurs est à la base du mode de transmission synaptique des signaux chimiques les plus connus. Cette forme de transmission est rapide et brève, avec un délai synaptique court de l'ordre de 0,5 à 1 ms.

B. RÉCEPTEURS LIÉS AUX PROTÉINES G.

Ces récepteurs ne sont pas capables de déclencher directement des modifications de la perméabilité ionique. La fixation du neuromédiateur sur ce type de récepteur entraîne une cascade de réactions :

- activation du récepteur qui est une protéine membranaire.
- stimulation d'une protéine G.
- l'adényl-cyclase qui catalyse la conversion de l'ATP en AMP cyclique qui constitue le 2^e messager.
- activation d'une protéine-kinase par l'AMPc. Cette protéine phosphoryle le groupement hydroxyle de certains acides aminés, constituant les protéines canalaire.

Ces protéines ainsi modifiées changent la perméabilité des canaux ioniques. Selon la nature et le sens des mouvements ioniques, on aboutira soit à une dépolarisation de la membrane post-synaptique dans le cas des synapses excitatrices, soit à une hyperpolarisation dans le cas des synapses inhibitrices.

4. LA TRANSMISSION SYNAPTIQUE AU NIVEAU DE LA JONCTION NEUROMUSCULAIRE

C'est la jonction entre une terminaison nerveuse du motoneurone et une fibre musculaire striée. Elle porte le nom de plaque motrice.

4.1 FONCTIONNEMENT DE LA PLAQUE MOTRICE

La transmission synaptique de l'influx nerveux au niveau de la jonction neuromusculaire, se fait selon les étapes suivantes :

1^{RE} ÉTAPE

Dans les conditions physiologiques, le potentiel d'action naît dans le corps cellulaire du motoneurone et se propage le long de l'axone grâce aux récepteurs Na^+ voltage-dépendants et atteint l'extrémité axonale riche en électro récepteurs Ca^{++} (canaux voltage dépendants). Sous l'influence de la dépolarisation axonale, ces récepteurs s'ouvrent et laissent entrer sélectivement les ions Ca^{++} .

L'augmentation de la concentration en Ca^{++} dans la terminaison présynaptique, stimule la libération de l'acétylcholine dans la fente synaptique.

2^E ÉTAPE

L'acétylcholine libérée se fixe sur des récepteurs nicotiniques situés dans la membrane post synaptique de la cellule musculaire et provoque leur ouverture.

3^E ÉTAPE

Une fois ouverts, on assiste à une entrée de Na^+ et de K^+ à l'origine d'une dépolarisation locale appelée : potentiel de la plaque motrice (PPM).

4^E ÉTAPE

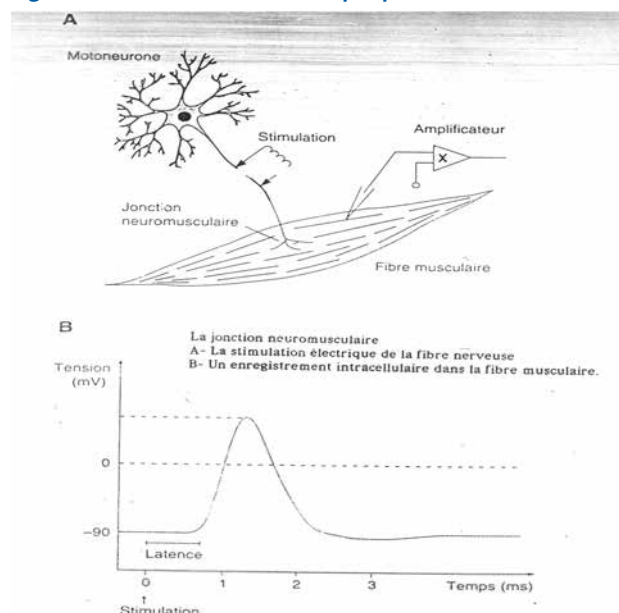
Entre la plaque motrice dépolarisée et la membrane musculaire adjacente au repos, s'établissent des courants locaux. Ainsi le PPM entraîne une dépolarisation des régions membranaires de la fibre musculaire grâce à l'ouverture des canaux Na^+ voltage-dépendants de la membrane musculaire. Cette dépolarisation va se propager à toute la fibre musculaire.

Dans les conditions physiologiques, l'amplitude du PPM est toujours très grande, de sorte que le seuil de déclenchement du potentiel d'action est toujours atteint. Il en résulte donc, qu'un potentiel d'action axonal déclenche toujours un potentiel dans la fibre musculaire.

5^E ÉTAPE

L'acétylcholine n'a pas le temps d'induire un second potentiel d'action, car il est rapidement inactivé par l'acétyl cholinestérase.

Figure. 3 Fonctionnement de la plaque motrice



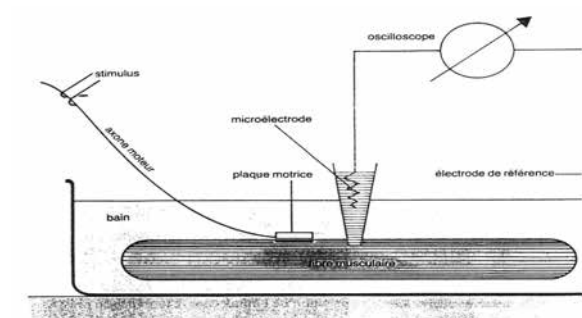
4.2 LE PPM

À la suite d'une stimulation du nerf moteur, on enregistre au niveau de la plaque motrice un potentiel d'action superposé au PPM.

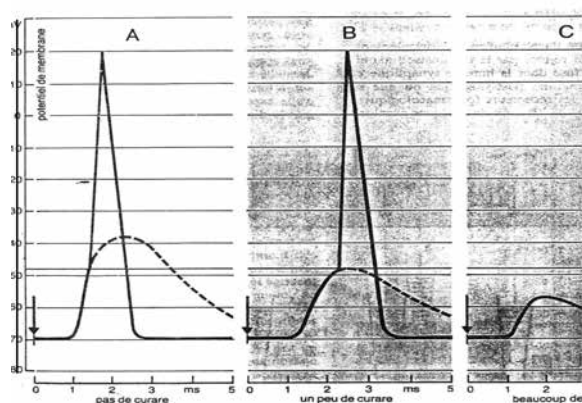
Pour détecter un PPM à l'état isolé, il est nécessaire d'empêcher le déclenchement du potentiel d'action dans la fibre musculaire. Pour bloquer ce potentiel d'action, on utilise du curare qui se fixe sur les récepteurs à l'acétylcholine et l'empêche d'agir. La curarisation ménagée permet de faire disparaître le potentiel d'action et d'isoler le PPM.

L'augmentation de la concentration du curare provoque la diminution de l'amplitude du PPM. Tant qu'elle est supérieure à la valeur seuil, elle provoque la naissance d'un potentiel d'action ; lorsque cette amplitude devient inférieure à cette valeur seuil, la transmission synaptique est bloquée et le PPM peut être analysé à l'état isolé. Il s'agit d'un potentiel local graduable et sommable.

Figure. 4 Expérience de curarisation ménagée



MONTAGE EXPERIMENTAL DE L'ENREGISTREMENT DES



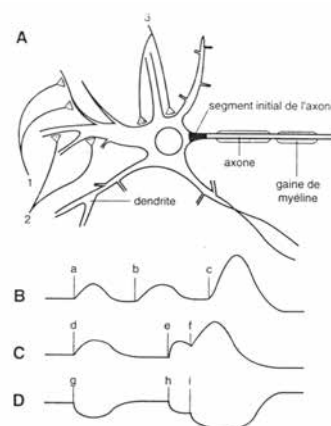
5. MÉCANISMES POST-SYNAPTIQUES DANS LE SYSTÈME NERVEUX CENTRAL

5.1 TRANSMISSION SYNAPTIQUE AU NIVEAU DES SYNAPSES EXCITATRICES

L'interaction du neuromédiateur excitateur avec son récepteur post synaptique entraîne dans la plupart des cas l'ouverture de canaux perméables aux ions Na^+ et K^+ à l'origine d'une dépolarisation locale appelée PPSE. Dans les conditions normales, le potentiel membranaire est négatif (environ -60 mV).

La dépolarisation induite par un seul PPSE est faible, de l'ordre de 0,2 à 1 mV, alors qu'il faudrait une dépolarisation d'environ 15 mV pour atteindre le seuil de déclenchement du potentiel d'action. Pour cela, il est nécessaire que plusieurs PPSE s'additionnent : c'est le phénomène de sommation.

- **la sommation spatiale** : Le neurone reçoit simultanément des PPSE provenant de plusieurs neurones présynaptiques. Lorsque la sommation spatiale se maintient ou augmente, elle entraîne une augmentation de la fréquence de décharge du neurone.
- **la sommation temporelle** : le neurone post synaptique reçoit des décharges répétitives qui augmente la fréquence des PA.



SOMMATION SPATIALE ET SOMMATION TEMPORELLE
ACTION INTÉGRATRICE DU NEURONE

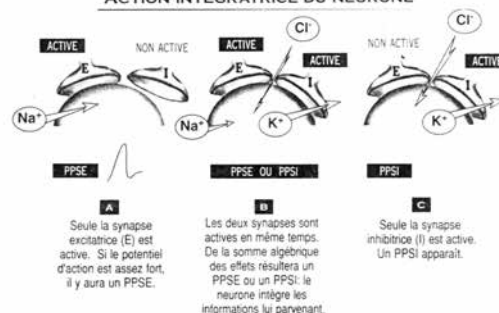


Figure 5. PPSE /PPSI

5.2 TRANSMISSION SYNAPTIQUE AU NIVEAU DES SYNAPSES INHIBITRICES

L'interaction neuromédiateur / récepteur crée un courant d'hyperpolarisation locale appelé PPSI. Ce PPSI est dû soit à l'entrée de charges négatives (Cl⁻ pour les récepteurs GABA) ou à la sortie de charges positives (K⁺ pour la dopamine).

6. ASPECTS NEUROCHIMIQUES DE LA COMMUNICATION INTERNEURALE

6.1 INTÉGRATION DE L'INFORMATION NEURONALE

Le neurone post synaptique peut recevoir plusieurs boutons synaptiques les uns inhibiteurs, les autres excitateurs. Au niveau de ce neurone va se développer un potentiel égal à la somme algébrique des potentiels inhibiteurs et excitateurs (PPSE + PPSI).

Mais au cours de la dernière décennie, le concept de synapse a considérablement évolué par l'identification de propriétés intrinsèques suggérant que la synapse est adaptable dans son fonctionnement et qu'elle subit une régulation aussi bien pré que post synaptique.

6.2 LES RÉGULATIONS PRE-SYNAPTIQUES

A. AUTORÉGULATION DE L'ACTIVITÉ DES TERMINAISONS NERVEUSES

Il s'agit d'un mécanisme par lequel les terminaisons nerveuses régulent leur propre activité, la substance neuro active libérée agit sur ses propres récepteurs situés sur le neurone présynaptique : autorécepteurs.

Cette rétroaction est généralement négative : le neuromédiateur tendant à réduire l'activité de l'élément qui l'a libéré.

B. RÉGULATION PRÉSYPNAPTQUE INTERNEURONALE

Dans ce cas, le neuromédiateur libéré par un neurone va moduler l'activité des terminaisons nerveuses voisines libérant un autre neuromédiateur. Ces interactions présynaptiques s'exercent par l'intermédiaire de récepteurs présynaptiques qui sont dénommés hétérorécepteurs.

C. LES RÉGULATIONS POST-SYNAPTIQUES

* Autorégulation au niveau somatique

Le neuromédiateur libéré par l'ensemble somato-dendritique aurait la possibilité d'agir à ce même niveau sur les neurones qui l'ont libéré. Cette libération somato-dendritique a été mise en évidence au niveau des neurones nigrostriés dopaminergiques. Cette libération se fait par diffusion indépendamment du PA.

* Régulation au niveau des récepteurs post-synaptiques

Un défaut de stimulation du récepteur induit une hypersensibilité au neuromédiateur alors qu'une hyperstimulation ou d'une stimulation prolongée provoquent une hyposensibilité, ou d'une désensibilisation. Ceci peut être expliqué par une diminution de l'affinité du récepteur pour le neuromédiateur, ou du nombre de sites de fixation du neuromédiateur, soit encore de la sensibilité de l'effecteur intramembranaire.

6.3 COEXISTENCE DE PLUSIEURS NEUROMÉDIATEURS DANS LE MÊME NEURONE

La mise en évidence de la coexistence de plusieurs neuromédiateurs dans le même neurone est l'un des éléments majeurs de l'évolution du concept des synapses. L'association la plus fréquente est celle d'un neuromédiateur de faible poids moléculaire avec un neuropeptide.

L'étude de la localisation ultra-structurale des neuromédiateurs évoque la possibilité d'un stockage de ces neuromédiateurs au niveau des mêmes vésicules synaptiques, mais plus fréquemment il semble qu'ils soient présents dans des populations de vésicules différentes; d'où la possibilité de libération différente des deux neuromédiateurs par une même terminaison nerveuse.

7. LES NEUROMÉDIATEURS

Un neuromédiateur pour être « accepté » comme tel devrait satisfaire les critères suivants :

- synthétisé par un neurone présynaptique
- libéré en quantité suffisante pour exercer une action sur le neurone post synaptique.
- Reproduit l'effet du neurotransmetteur lorsqu'on l'applique directement sur le neurone libre.
- inactivé rapidement.

On considère que les neurotransmetteurs se répartissent en deux grandes catégories

- Les neuromédiateurs de faible poids moléculaire.
- Les neuropeptides.

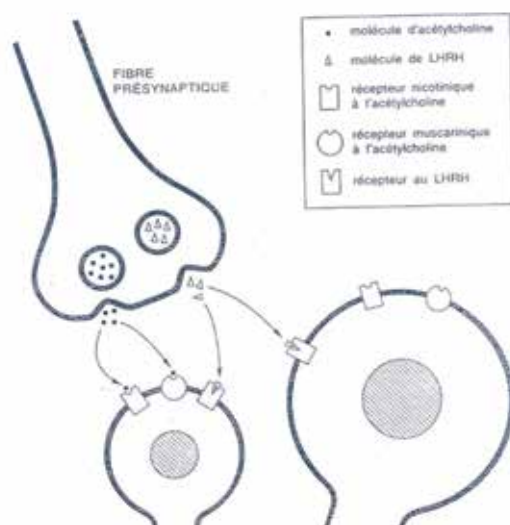
8. NEUROTRANSMISSION ET NEUROMODULATION

L'ensemble des substances neuroactives sécrétées par les neurones et jouant le rôle dans la communication intercellulaire peuvent être regroupées sous le terme de neuromédiateurs qui regroupent les neurotransmetteurs et les neuromodulateurs.

8.1 LES NEUROTRANSMETTEURS

Ce sont des substances qui contribuent directement à l'action synaptique. Le neurotransmetteur est une substance localisée au niveau des neurones, avec des enzymes de synthèse et son appareil de dégradation, d'où elle peut être libérée par des terminaisons axoniques par un mécanisme Calcium dépendant sous l'influence des potentiels d'action. Le neurotransmetteur agit sur des récepteurs spécifiques au niveau des fonctions synaptiques et produit une réponse biologique, le plus souvent en agissant sur des canaux ioniques. Cette action est ponctuelle, limitée dans le temps et l'espace, n'affectant que la partie de la membrane cellulaire où se trouvent les canaux ioniques activés.

Figure 6. Neuromédiateurs



8.2 LES NEUROMODULATEURS

Le terme de neuromodulateur définit toute substance qui affecte l'excitabilité de la cellule nerveuse et participe à un mécanisme de régulation de l'activité du système nerveux.

Son action s'exerce donc principalement sur la libération du neurotransmetteur au niveau présynaptique ou directement sur le degré d'excitabilité de l'élément post-synaptique. La caractéristique principale du neuromodulateur libéré par différentes parties du neurone au niveau de structures synaptiques ou non synaptiques, est qu'il n'aurait pas d'effets directs sur le potentiel de membrane, la conductance ionique ou la décharge des neurones. Il agirait plutôt en activant des réactions chimiques comme la production d'AMP cyclique, la stimulation d'ATPase membranaires. Par conséquent, l'action des neuromodulateurs semble être un phénomène diffus dans l'espace et dans le temps. Les molécules libérées vont diffuser dans la structure nerveuse pour atteindre des récepteurs situés à une certaine distance du lieu de libération.

De par la multiplicité des mécanismes d'action, on est amené à admettre qu'au niveau du système nerveux chaque substance pourrait avoir la possibilité d'agir en tant que neurotransmetteur à un site et de jouer le rôle de modulateur à un autre.

LES FONCTIONS MOTRICES DE LA MOELLE ÉPINIÈRE ET LES RÉFLEXES MÉDULLAIRES

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. Définir une réaction réflexe.
2. Décrire les conditions d'étude des réflexes médullaires chez les mammifères.
3. Décrire la technique permettant l'étude des réflexes médullaires.
4. Définir les deux composantes du réflexe myotatique.
5. Décrire l'organisation de l'arc réflexe myotatique.
6. Indiquer le rôle du MTN g.
7. Indiquer le rôle de la boucle dans l'entretien du tonus musculaire.
8. Décrire l'organisation de l'arc réflexe myotatique inverse
9. Définir le réflexe ipsilatéral de flexion.
10. Décrire l'organisation du réflexe ipsilatéral de flexion.
11. Définir la notion d'innervation réciproque.
12. Décrire les explorations cliniques des réflexes de flexion
13. indiquer le rôle des structures du tronc cérébral dans la régulation du tonus musculaire.

PLAN

1. INTRODUCTION

2. GÉNÉRALITÉS

3. MÉTHODES D'ÉTUDES DES RÉFLEXES

4. PRINCIPAUX RÉFLEXES

5. RÉGULATION DES RÉFLEXES

1. INTRODUCTION

La motricité peut être définie comme l'ensemble des mécanismes qui permettent à un organisme vivant d'effectuer des mouvements. Ces mouvements peuvent être :

- Phasiques ayant pour conséquence un déplacement par rapport au support.
- Toniques ayant pour but le maintien d'un état d'immobilité entraînant la conservation des attitudes ou postures. Ces deux aspects de la motricité sont complémentaires. En effet un mouvement, quel qu'il soit ne peut se réaliser efficacement que si le contexte postural le permet. Les mouvements de marche ne peuvent s'effectuer qu'en posture érigée. Qu'elle soit tonique ou phasique, la motricité nécessite le jeu harmonieux de groupes musculaires.

Pour se contracter, les muscles squelettiques reçoivent des ordres du système nerveux central sous forme d'influx nerveux. Les différentes parties du système nerveux qui commandent ces contractions musculaires sont hiérarchisées et de ce fait la motricité est plus ou moins élaborée. D'après cette conception le système nerveux peut être divisé en 3 parties : la moelle épinière, le tronc cérébral, et enfin l'encéphale ou cortex cérébral. Cette conception se rapproche de celles basées sur l'acquisition phylogénétique progressive des différentes parties du système nerveux central.

- La moelle épinière est responsable de certains aspects automatiques de la marche et la réalisation de certains mouvements : il s'agit d'une motricité réflexe.
- Le tronc cérébral ou partie basse du cerveau assure surtout le maintien d'attitudes et l'équilibre du corps.
- Le cortex cérébral contrôle la motricité volontaire dite « intentionnelle ».

Toutefois, opposer motricité réflexe et motricité intentionnelle n'a de sens que dans la mesure où elles sont élaborées à des niveaux différents du système nerveux, mais ne correspondent pas à la réalité d'un mouvement. Le motoneurone constitue la « voie finale commune » sur laquelle s'exercent des influences sensorielles et des influences provenant des centres nerveux supérieurs.

Ce poly a été téléchargé depuis <http://med-tmss.blogspot.com/2016/08/cours.html>

Donc, cette commande motrice est en permanence contrôlée, modulée et régulée par des structures sensorielles et encéphaliques, modulation qui s'exerce de façon très précise et qui donne aux mouvements leur souplesse et leur précision.

2. GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉFLEXES

Isolée du cerveau la moelle épinière est capable d'assurer un certain nombre de réponses motrices automatiques appelées réflexes.

Ces réactions motrices sont innées, inconscientes et involontaires.

La destruction de la moelle épinière abolit ces réflexes : La moelle est donc le centre nerveux responsable de ces réactions motrices.

3. MÉTHODES D'ÉTUDES DES RÉFLEXES

3.1 PRÉPARATION DE L'ANIMAL

Les fonctions de la moelle épinière sont contrôlées par des signaux provenant du cerveau. Pour étudier les réflexes médullaires, il est nécessaire de séparer la moelle des centres supérieurs. Deux méthodes sont couramment utilisées :

• LA SPINALISATION

L'animal spinal est préparé en provoquant une section sous bulbaire. La grenouille spinale constitue un matériel de choix pour l'étude des réflexes médullaires, car chez les mammifères une telle section entraîne un choc spinal. Ce choc est caractérisé par une période d'aréflexie, c'est à dire, une période de disparition de toute activité réflexe pendant une durée variable en fonction de leur évolution phylogénétique. De plus, à la suite d'une telle section, les nerfs phréniques, contrôlant les mouvements du diaphragme, se trouvant séparés de toute commande supérieure, sont déprimés d'où la nécessité d'établir une respiration artificielle. Pour remédier à ces inconvénients, on pratique chez les mammifères une décérébration.

• DÉCÉRÉBRATION

Dans la préparation décérébrée, on pratique une section transrubrique où le tronc cérébral est sectionné entre les tubercles quadrijumeaux antérieurs et postérieurs (colliculus inférieurs et supérieurs) et passant par les noyaux rouges. Une telle section présente plusieurs avantages, car elle :

- abolit les centres de contrôle volontaire ;
- évite le choc spinal ;
- laisse intacts les centres nerveux végétatifs respiratoires bulbaires.
- supprime les influences inhibitrices du tronc cérébral, ce qui provoque une augmentation de la tonicité de l'animal et une exagération de certains de ses réflexes.

3.2 ÉTUDE ÉLECTROPHYSIOLOGIQUE DES RÉFLEXES

Cette technique consiste à provoquer des stimulations électriques au niveau de la racine rachidienne postérieure et d'enregistrer la réponse électrique au niveau de la racine rachidienne antérieure.

- Une stimulation unique et de faible intensité portée sur la racine rachidienne postérieure provoque l'excitation des grosses fibres ipsilatérales du même segment médullaire. On enregistre après un temps de latence court, une décharge électrique formée d'une pointe brève. Cette réponse constitue le potentiel d'action d'un certain nombre de motoneurones qui ont été activés directement par les fibres sensibles stimulées. Ce temps de latence court n'est compatible qu'avec la présence d'une seule synapse entre les éléments afférents et efférents. Il s'agit donc d'un réflexe monosynaptique localisé à un seul niveau de la moelle.
- Une stimulation unique et de forte intensité provoque l'activation de l'ensemble des fibres sensibles (groupe I, II, III, IV). On enregistre dans ce cas au niveau de la racine antérieure, en plus de la pointe unique, un ensemble complexe d'ondes de forme irrégulière appelé décharge polysynaptique ou post-décharge. Il s'agit ici d'un réflexe polysynaptique. Son circuit est formé de plusieurs neurones faisant intervenir un certain nombre d'interneurones.

Cette technique électrophysiologie nous permet donc de distinguer deux types de réflexes médullaires :

- Le réflexe monosynaptique, formé d'un circuit circonscrit. C'est un réflexe localisé faisant intervenir une seule synapse entre les fibres sensibles et motrices.
- Le réflexe polysynaptique diffus formé de circuit nécessitant la mise en jeu de plusieurs interneurones susceptibles de stimuler un grand nombre de motoneurones et de groupes musculaires faisant intervenir ainsi plusieurs étages de la moelle épinière. La réponse des motoneurones dépend de l'état d'excitabilité des interneurones ce qui explique la variabilité des réponses au niveau des réflexes polysynaptiques.

4. PRINCIPAUX RÉFLEXES

4.1 RÉFLEXE MYOTATIQUE

Le réflexe myotatique ou réflexe d'étirement se traduit par une augmentation de la contraction du muscle en réponse à son propre étirement.

A. MISE EN ÉVIDENCE

Le réflexe a été découvert au début du siècle au cours d'une étude des réflexes posturaux chez le chat décérébré.

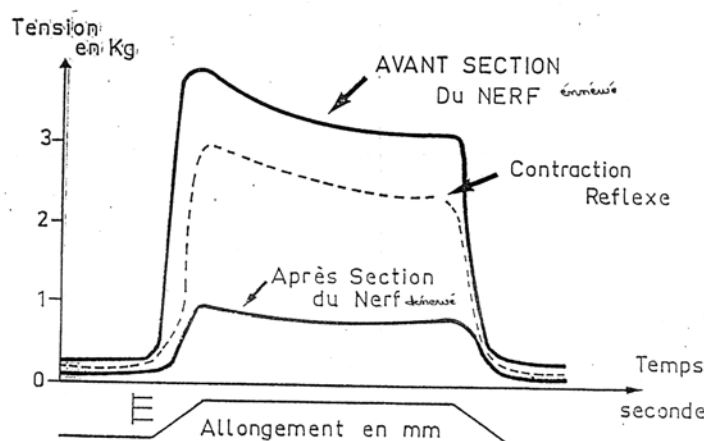
L'animal repose sur une table pouvant être élevée ou abaissée par rapport au myographe de façon à étendre ou à étirer le muscle quadriceps.

Un étirement de 8 mm pendant une seconde s'accompagne d'une augmentation de la force musculaire (courbe M).

À la suite de la section du nerf innervant le muscle, le même étirement provoque une tension plus faible correspondant à la propriété élastique du muscle. Cette réponse comprend deux composantes :

- Une composante rapide appelée phasique ou dynamique provoquée par un étirement de courte durée.
- Une composante tonique ou statique lors d'un étirement de plus longue durée. La contraction réflexe est maintenue tout au long de l'étirement ce qui constitue la réaction statique du réflexe myotatique.

Figure. 1 Étude du réflexe myotatique



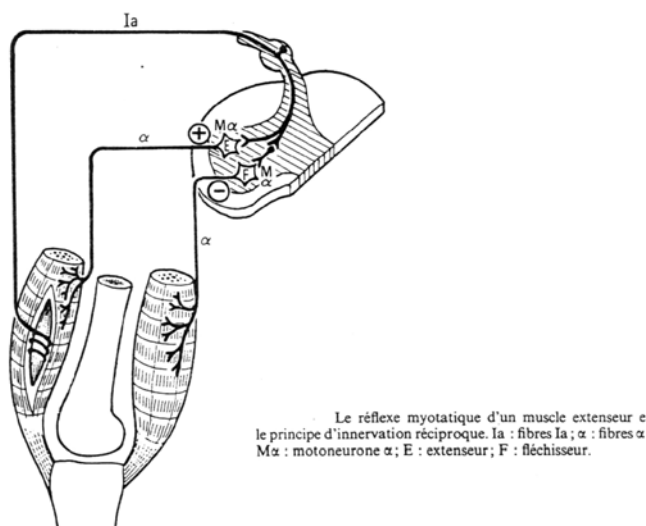
Enregistrement de la Force Développée

B. ORGANISATION DU RÉFLEXE MYOTATIQUE

L'étirement d'un muscle active le fuseau neuromusculaire et déclenche une contraction réflexe du muscle étiré.

Ce réflexe est entretenu par un circuit qui comprend : le fuseau neuromusculaire, la fibre sensitive Ia, le motoneurone α et la jonction neuromusculaire.

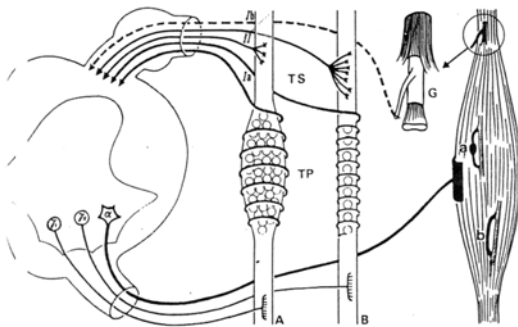
Figure. 2. Réflexe myotatique



* Les fuseaux neuromusculaires

Il existe deux types de fuseaux neuromusculaires : à sacs nucléaires à chaînes nucléaires qui sont 3 fois plus nombreux que les premiers.

Figure. 3 Le fuseau neuromusculaire



Fuseaux neuro-musculaires et appareil de Golgi

* L'innervation sensitive

Elle est assurée par deux types de fibres sensibles :

• Les terminaisons primaires

Ce sont des fibres du type Ia, gros diamètre, myélinisé et à vitesse de conduction rapide (100 m/s). Elles se terminent au niveau de la région équatoriale des fuseaux neuromusculaires de façon spiralée et forment ce qu'on appelle les terminaisons primaires ou annulospirales. Ces fibres innervent les fuseaux neuromusculaires à sacs et à chaînes nucléaires. Ces fibres sont dynamiques et codent pour la vitesse de l'étirement.

• Les terminaisons secondaires

Ce sont des fibres sensibles de type II, de calibres plus petits (diamètre de 8 μ) et innervant la région réceptrice située de part et d'autre de la zone innervée par la terminaison primaire. Ces fibres innervent les fuseaux neuromusculaires à chaînes nucléaires. Ces fibres sont statiques et codent pour la durée de l'étirement et la longueur atteinte par le muscle.

* L'innervation motrice

La corne antérieure de la moelle épinière contient de nombreux motoneurones. On peut distinguer deux types de motoneurones :

- Les motoneurones α

Ils ont des axones de gros diamètre et innervent les fibres musculaires extrafusoriales. Ils sont directement responsables de la contraction musculaire (cf. plaque motrice).

- Les motoneurones γ

Ils sont beaucoup plus petits que les MN α et deux fois moins nombreux. Ils innervent les deux parties polaires des fuseaux neuromusculaires. On distingue : les fibres γ dynamiques et les fibres γ statiques.

γ dynamiques stimulent surtout les fuseaux neuromusculaires à sacs nucléaires, et les γ statiques stimulent les fuseaux à chaînes nucléaires.

Si les fibres γ dynamiques sont stimulées, la réponse dynamique du fuseau neuromusculaire est augmentée alors que la réponse statique n'est pratiquement pas modifiée. La stimulation des fibres statiques augmente la réponse statique, mais ne modifie pas la réponse dynamique.

C. DIFFÉRENTS TYPES DE RÉFLEXE MYOTATIQUE

• Le réflexe myotatique dynamique

L'allongement brusque d'un muscle stimule les terminaisons primaires du fuseau neuromusculaire, provoquant une forte contraction réflexe du muscle. Ce réflexe fait intervenir les fibres Ia

L'étude de ces réflexes est entreprise dans le but de rechercher la présence de spasticité musculaire après des lésions des aires cérébrales motrices. En pratique clinique, on explore :

Le réflexe rotulien

C'est la contraction réflexe du quadriceps à la suite de la percussion du tendon rotulien. Il en résulte à l'état normal un mouvement d'extension de la jambe. À l'état pathologique, on observe une diminution ou au contraire une exagération de ce réflexe.

Le réflexe achilléen

On percute le tendon d'Achille et on observe à l'état normal, une contraction réflexe du triceps qui engendre un mouvement d'extension du pied. Les modifications de la réponse indiquent une lésion localisée à S1.

• Le réflexe myotatique statique ou tonique

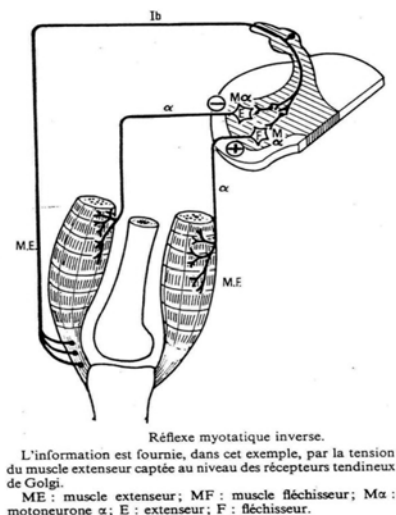
Un muscle étiré répond par une contraction qui dure tout au long de l'étirement. Il joue un rôle prépondérant dans l'élaboration du tonus musculaire, et par conséquent, dans le maintien des postures. En effet, le tonus se définit comme étant une semi-contraction du muscle.

4.2 LE RÉFLEXE TENDINEUX DE GOLGI

L'organe tendineux de Golgi est un récepteur encapsulé situé au niveau des tendons des muscles. Il est placé en série avec les fibres musculaires. Contrairement au fuseau neuromusculaire qui est sensible à la longueur du muscle, l'organe tendineux de Golgi est sensible à la tension et répond d'une manière dynamique en réponse à une augmentation brusque de la tension du muscle et d'une manière statique plus faible et stable, proportionnelle à la tension dans le muscle. Les organes tendineux de Golgi fournissent donc au système nerveux central une information instantanée du degré de tension (force) dans chaque muscle. Le signal produit par l'organe tendineux de Golgi est transmis par des fibres de type Ib à la moelle épinière et à des centres sus-jacents comme le cervelet et le cortex cérébral. Au niveau de la moelle épinière, la fibre Ib stimule un neurone qui lui-même inhibe un motoneurone α , ce qui a pour effet de diminuer la tension du muscle. Lorsque la tension d'un muscle devient excessive, l'effet inhibiteur du réflexe peut provoquer le relâchement du muscle. Ce réflexe aurait donc une fonction de protection contre les conséquences d'un excès de tension, il éviterait ainsi la déchirure musculaire.

Ainsi le réflexe tendineux pourrait constituer un mécanisme de self-contrôle de la tension musculaire : lorsque la tension devient élevée, l'organe tendineux décharge, ce qui inhibe les motoneurones et inversement lorsque la tension est basse, l'inhibition des motoneurones est élevée, ce qui ramène la tension musculaire à un niveau normal.

Figure.4 Réflexe myotatique inverse



4.3 RÉFLEXES DE FLEXION

La stimulation nociceptive d'une partie du corps déclenche un réflexe de retrait de la partie stimulée : il s'agit réflexe de défense et de protection de l'organisme. Ces réflexes impliquent des récepteurs cutanés, musculaires, articulaires et viscéraux.

Le circuit de base du réflexe de flexion comprend une voie afférente de faible diamètre (neurones de type III et IV) s'articulant polysynaptiquement avec les motoneurones α . La stimulation douloureuse provoque, en même temps, une stimulation des motoneurones a des fléchisseurs et une inhibition des motoneurones a des extenseurs.

Ces réflexes sont des réflexes polysynaptiques et diffus : En effet, si on augmente l'intensité de la stimulation la réaction de flexion, s'étend à d'autres muscles et peut même se généraliser.

Les réflexes polysynaptiques explorés en pratique neurologique sont essentiellement :

• LE RÉFLEXE MÉNINGÉ : SIGNE DE KERNIG

Au cours d'une méningite, la flexion de la nuque entraîne la flexion de la cuisse sur le tronc.

• LE RÉFLEXE CUTANÉ PLANTAIRE

La stimulation au moyen d'une pointe mousse du bord externe de la plante du pied d'arrière en avant, provoque chez le sujet normal une flexion rapide du gros orteil.

4.4 RÉFLEXES DE POSTURE ET DE LOCOMOTION

Un certain nombre de réactions coordonnées qui assurent le maintien de la posture et la locomotion sont intégrées par la moelle épinière. C'est le cas des réflexes de soutien et de redressement, et des mouvements rythmiques de locomotion. Ces mouvements se composent d'une flexion des pattes vers l'avant, suivie d'une extension vers l'arrière. Cette séquence peut se répéter indéfiniment. Ces mouvements rythmiques reposent sur une activité alternative des muscles fléchisseurs et extenseurs.

5. RÉGULATION DES RÉFLEXES

5.1 RÉGULATION SEGMENTAIRE DE LA MOTRICITÉ

A. CONTRÔLE DE L'ACTIVITÉ FUSORIALE

Le réflexe myotatique à lui seul ne permet pas d'expliquer une contraction tonique permanente du muscle. En effet, un muscle qui se contracte se raccourcit et les FNM ne sont plus sollicités ce qui a pour conséquence le relâchement du muscle. À l'état physiologique, il existe un mécanisme qui permet d'entretenir la stimulation des FNM même si le muscle est contracté (diminution de la longueur) : c'est la fusimotricité. En effet, les motoneurones γ innervent les extrémités striées du fuseau neuromusculaire, et provoquent leur contraction.

La conséquence de cette contraction est un étirement de la partie centrale du fuseau et sa stimulation. L'innervation fusio-motrice réamorçage donc le réflexe myotatique, module son activité en réglant l'état de tension et de sensibilité des fuseaux neuromusculaires.

Cette activité γ reçoit en permanence des messages provenant essentiellement des structures supramédullaires. Ainsi, tout facteur susceptible de déclencher l'activité γ va renforcer le réflexe myotatique et le tonus musculaire. Inversement tout facteur inhibant l'activité γ diminue l'intensité du réflexe myotatique et le tonus musculaire.

Cette fusimotricité est aussi impliquée dans la commande motrice volontaire. En effet, lorsque le cortex moteur est activé, il se produit une activation simultanée des motoneurones α et γ . Cette co-activation des motoneurones α et γ s'accompagne d'une contraction des fibres musculaires intra et extra fusoriales et empêche le fuseau musculaire de s'opposer à la contraction musculaire, tout en maintenant les fonctions et l'amortissement du fuseau à un niveau adéquat.

B. INTÉGRATION SENSORI-MOTRICE AU NIVEAU MÉDULLAIRE

Les réflexes déjà décrits montrent que la moelle épinière est un centre d'intégration sensori-moteur et qu'elle est capable d'élaborer une activité motrice en réponse à des stimulations sensorielles. Ce rôle d'intégration se fait grâce de nombreux mécanismes :

* Facilitations et inhibitions simultanées : phénomène d'innervation réciproque

Lorsque la contraction d'un muscle strié est provoquée par un stimulus réflexogène, cette réaction s'intègre dans une réaction coordonnée. Un mouvement harmonieux ne peut avoir lieu que lorsque le muscle agoniste se contracte et l'antagoniste se relâche : c'est le principe de l'innervation réciproque. Ce principe est applicable au réflexe myotatique, myotatique inverse et de flexion.

* Contrôle de l'activité α par le circuit de Renshaw

Ce système constitue un système de perfectionnement du réflexe myotatique. Les axones des motoneurones α émettent une collatérale qui s'articule avec un interneurone dit cellule de Renshaw situé dans la corne antérieure de la moelle épinière qui s'applique sur le motoneurone α . La synapse entre la collatérale du MTN α et le neurone de Renshaw est cholinergique, celle située entre le neurone et le motoneurone α est GABA ergique. Ce circuit a pour but de freiner l'activité du motoneurone α en cas de stimulations excessives : c'est un phénomène de feed-back négatif.

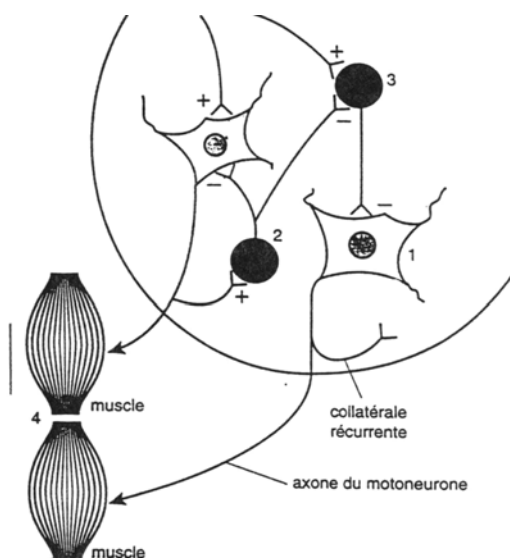


Figure. 5. le circuit de Renshaw

La corne ventrale de la moelle contient des motoneurones (1) qui commandent les muscles squelettiques. Les collatérales récurrentes des motoneurones activent un interneurone, appelé cellule de Renshaw (2) qui peut inhiber directement les motoneurones, limitant leur activité, et inhiber également des interneurons inhibiteurs (3) facilitant ainsi l'activité des muscles antagonistes.

5.2 RÉGULATION DES RÉFLEXES PAR LES STRUCTURES DU TRONC CÉRÉBRAL

Des expériences réalisées chez des animaux décérébrés et les données de la pathologie humaine ont révélé le rôle important des structures supra-médullaires dans le contrôle des activités réflexes.

La décérébration entraîne chez l'animal une rigidité qui prédomine au niveau des muscles antigravitaires (extenseurs des membres, du dos, du cou). Cette rigidité se manifeste par une exagération du tonus musculaire secondaire à une hyperactivité γ . La section des racines rachidiennes postérieures détermine la disparition de cette rigidité.

En effet, la décérébration a provoqué un déséquilibre entre les influences descendantes excitatrices et inhibitrices en faveur des voies excitatrices.

A. VOIES DESCENDANTES EXCITATRICES

Ces voies sont issues des structures suivantes :

* LA FORMATION RÉTICULÉE PONTIQUE

Chez l'Homme, elle stimule les motoneurones α et γ des muscles antigravitaires : musculature axiale, proximale, extenseurs des membres inférieurs et fléchisseurs des membres supérieurs. Ainsi, cette structure joue un rôle important dans la genèse du tonus musculaire et le maintient postural.

* LES NOYAUX VESTIBULAIRES

Leur action s'exerce sur les motoneurones α et γ des muscles antigravitaires via le faisceau vestibulo-spinal. Cette voie joue également un rôle important dans le maintien de l'équilibre et la posture.

B. VOIES DESCENDANTES INHIBITRICES

* LA FORMATION RÉTICULÉE BULBAIRE

Les faisceaux réticulo-spinaux issus de cette formation exercent une action inhibitrice sur les motoneurones α et γ des muscles antigravitaires. Cette formation est activée par des structures corticales facilitatrices.

* LE NOYAU ROUGE

Le noyau rouge mésencéphalique projette sur ces motoneurones de la moelle épinière par la voie rubro-spinale. Cette voie existe à l'état vestigial chez l'Homme et l'effet du noyau est pratiquement négligeable sur le tonus et la posture.

FONCTIONS STATIQUES ET ÉQUILIBRATION

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

- 1 Décrire les réflexes statiques et les réflexes de redressement
- 2 indiquant leur(s) centre(s) réflexe(s) et leur rôle dans le maintien de l'équilibre du corps.
- 3 Définir l'équilibration
- 4 citer les différents réflexes contribuant au maintien de la posture et de l'équilibre.
- 5 Énumérer les différents récepteurs labyrinthiques
- 6 indiquer leurs caractéristiques de ces récepteurs.
- 7 Indiquer et décrire le mode d'activation des récepteurs ampullaires
- 8 Décrire les réactions réflexes résultant de la stimulation.
- 9 Définir le nystagmus vestibulaire.
- 10 Expliquer le mécanisme d'activation des récepteurs maculaires
- 11 Indiquer les principales réactions réflexes secondaires à la stimulation de ces récepteurs.
- 12 Décrire quelque(s) test(s) clinique(s).
- 13 Décrire les réflexes de posture et de redressement d'origine vestibulaire et préciser le(s) centre(s) réflexes) jouant un rôle dans la naissance de ces réflexes.
- 14 Décrire les réflexes proprioceptifs du cou, et indiquer le rôle de ces réflexes et leur rapport avec les réflexes labyrinthiques.
- 15 Expliquer le rôle des réflexes proprioceptifs et extéroceptifs provenant d'autres parties du corps et qui jouent un rôle important dans l'équilibre.
- 16 Expliquer le rôle des réflexes visuels dans l'équilibration et leur rapport avec les récepteurs labyrinthiques.

PLAN

1. INTRODUCTION
 2. LES RÉACTIONS D'ADAPTATION STATIQUES
 3. LES RÉACTIONS DE COMPENSATION DYNAMIQUE
 4. SENSATIONS VESTIBULAIRES
 5. AUTRES FACTEURS DE L'ÉQUILIBRE
- CONCLUSION

1. INTRODUCTION

La fonction statique a pour rôle de stabiliser l'homme ou l'animal dans sa station caractéristique dite station fondamentale ou posture, grâce à une activité permanente de presque tous les muscles du corps, qui s'oppose aux forces de la pesanteur.

Mais, dans la vie courante, cet équilibre est menacé, durant les différentes activités : simples mouvements, exercices sportifs, mouvements professionnels, etc.

L'homme est donc, amené à maintenir sa posture caractéristique (posture érigée) et à la rétablir si elle est perturbée, et ceci grâce à l'équilibration.

L'équilibration consiste donc, à lutter contre les effets de la gravité, à assurer l'équilibre du corps immobile lorsqu'une force externe tend à le déstabiliser (Poussée latérale, accélération verticale, etc.); et finalement à coordonner le maintien de l'équilibre du corps lors de l'exécution d'un mouvement ou d'un déplacement.

Ces fonctions de l'équilibration sont assurées par des réactions compensatrices statiques et dynamiques mises en jeu grâce à l'activité des centres moteurs qui reçoivent des informations d'origine, labyrinthique, visuelle, proprioceptive et cutanée. Ces informations permettent aux centres nerveux moteurs de fournir à l'organisme des influx nerveux continus afin d'assurer le maintien et le rétablissement d'une posture normale.

L'équilibration occupe donc, une place particulière parmi les modalités sensorielles ; en effet, son activation déclenche des réflexes de compensation dans la motricité oculaire et axiale, mais évoque également des phénomènes perceptifs conscients, tels les vertiges.

En plus de l'appareil labyrinthique, d'autres organes sensoriels renseignent sur l'orientation dans l'espace, à savoir les récepteurs proprioceptifs articulaires surtout au niveau du cou, visuels renseignant sur le monde environnant et cutanés situés aux points de contact avec un support surtout au niveau de la plante des pieds. En raison de ces informations, le sujet dispose d'un ensemble de repères qui l'aident à réaliser des réactions compensatoires dans lesquelles la position de la tête est déterminante. En fonction de la nature des perturbations, on distingue des réactions de compensation statiques et les réactions dynamiques.

2. LES RÉACTIONS D'ADAPTATION STATIQUES

On distingue plusieurs types de réactions statiques.

2.1 STABILISATION DU CORPS IMMOBILE

La position verticale est une situation d'équilibre précaire, facilement compromise. Elle est stabilisée par des réactions d'adaptation du tonus musculaire, agissant comme un dispositif de correction.

Ces réactions peuvent être mises en évidence lorsqu'on place un sujet en position debout, les pieds joints, immobile, on voit que le corps oscille de façon permanente autour de sa position d'équilibre.

2.2 ADAPTATION AUX CHANGEMENTS DE POSITION

Ces réactions compensent les écarts de position du corps par rapport à la verticale lorsque cette position est compromise par une source de perturbation constante.

Ces réactions sont observées chez l'animal et chez l'homme. En effet, un homme placé sur un support inclinable. L'inclinaison lente d'un support vers l'avant ou vers l'arrière provoque des modifications du tonus musculaire dans les quatre membres et dans les muscles de la nuque ; afin de ramener l'axe vertical dans la position naturelle.

Si le plan est incliné vers l'avant, le tonus des muscles extenseurs est augmenté dans les membres supérieurs qui s'étendent, tandis que la tête est en hyperextension.

Le tonus des muscles extenseurs diminue dans les membres inférieurs qui fléchissent.

3. LES RÉACTIONS DE COMPENSATION DYNAMIQUE

Le système vestibulaire est à la base des réactions dynamiques du maintien de l'équilibre. L'un des exemples les plus classiques est le réflexe de retournement du chat.

3.1 RÉFLEXES DE REDRESSEMENT

Un chat est tenu à l'envers par ses quatre membres à environ un mètre au-dessus du sol. S'il est lâché, il est capable de rétablir sa position et d'atterrir sur ses membres.

Une fois le rétablissement de la tête commencé, le rétablissement de la position des membres antérieurs d'abord, postérieurs ensuite, intervient grâce aux messages sensitifs provenant des récepteurs articulaires et musculaires de la nuque et du tronc.

Dans la vie courante, ces réactions permettent de compenser les effets d'accélération positive (quand la vitesse augmente) ou négative (quand la vitesse diminue) ; qui peuvent être linéaires (accélération horizontale du train qui démarre ou s'arrête), ou verticale de l'ascenseur qui monte ou qui descend, ou angulaire (patineur qui tourne, ou passager dans un virage).

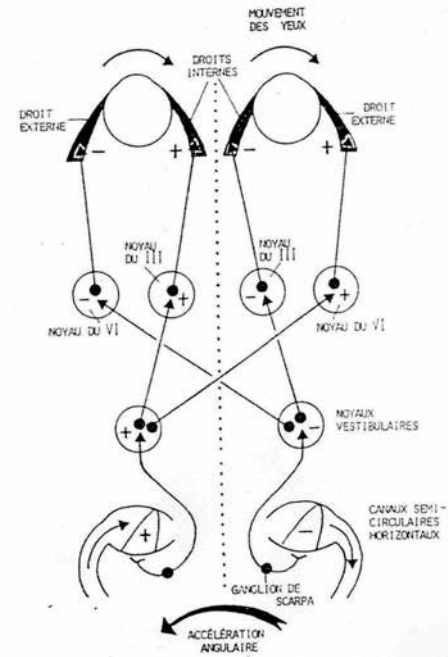
La réaction dynamique observée dans ces cas est une augmentation compensatrice du tonus des membres extenseurs.

Ces réactions sont possibles, car l'organisme est capable de détecter le sens de l'équilibre grâce à de nombreux récepteurs sensoriels : Les propriocepteurs musculaires et articulaires fournissent des indications sur la position de la tête et des membres, et des segments du corps les uns par rapport aux autres. La vision permet de connaître la position et les déplacements du corps dans son milieu. Cependant, les yeux fermés, nous sommes capables de reconnaître le haut du bas et de nous tenir debout, même soumis à une accélération et ceci grâce à l'appareil **vestibulaire**.

3.2 MOUVEMENTS VESTIBULO-OCULAIRES : NYSTAGMUS

En cas de stimulation labyrinthique par rotation de la tête, on observe des mouvements oculaires réflexes capables de compenser cette rotation et donc d'annuler tout déplacement de l'image au niveau de la rétine. En effet, on note une déviation lente des yeux dans le sens opposé à la rotation, suivie d'une secousse saccadée de rappel dans le même sens que la rotation, l'ensemble de ce réflexe vestibulo-oculaire est appelé **Nystagmus**.

Fig.1.
Réflexe vestibulo-oculaire horizontal



4. SENSATIONS VESTIBULAIRES

4.1 RAPPEL ANATOMO HISTOLOGIQUE DE L'APPAREIL VESTIBULAIRE

Le labyrinthe est situé dans l'os temporel et constitué de deux parties anatomiquement et fonctionnellement distinctes :

- La cochlée qui assure l'audition.
- L'appareil vestibulaire constitué par : les canaux semi-circulaires, l'utricule et le saccule.

A. LES CANAUX SEMI-CIRCULAIRES

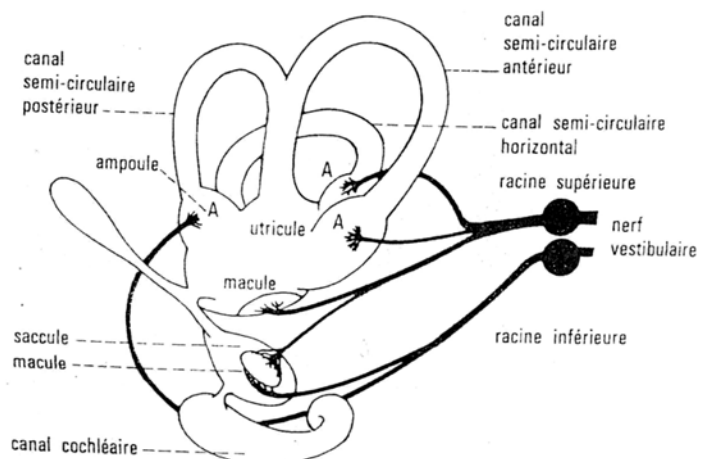
Les 3 canaux semi-circulaires externes (ou horizontaux) supérieur (ou antérieur) et postérieur sont situés perpendiculairement les uns aux autres dans les 3 plans de l'espace. Lorsque la tête est inclinée vers l'avant de 30° les 2 canaux semi-circulaires externes se trouvent dans un plan horizontal. Les canaux antérieurs supérieurs sont dans un plan vertical, orientés en avant et en dehors à 45° du plan frontal, les canaux postérieurs orientés en arrière et en dehors à 45° du plan frontal également. Le canal supérieur d'un côté est donc dans un plan parallèle à celui du canal postérieur opposé, les deux canaux externes étant, eux, sur le même plan. Chacun de ces canaux débouche dans l'utricule par ses deux extrémités dont l'une présente un renflement : l'ampoule. Celle-ci porte des crêtes ampullaires recouvertes d'une masse gélatineuse : la cupule. Les cellules sensorielles réceptrices sont ciliées. Les cils sont noyés dans la cupule qui comble la lumière de l'ampoule et les cellules ciliées sont reliées aux fibres nerveuses sensorielles qui gagnent le nerf vestibulaire.

B. L'APPAREIL OTOLITHIQUE UTRICULO-SACCAULAIRE

Ce récepteur se trouve à la face interne de l'utricule et du saccule. Il est formé d'un petit renflement de 2 mm de diamètre appelé macula. Chaque macule contient des milliers de cellules ciliées qui pénètrent dans une couche gélatineuse, baignent dans l'endolymphe et présentant à leurs extrémités des petits cristaux calcaires appelés otolithes.

Les bases et les côtés des cellules ciliées font synapse avec les prolongements périphériques des neurones formant le nerf vestibulaire.

Fig.2.
schéma de l'appareil labyrinthique



DISPOSITION DES RECEPTEURS LABYRINTHIQUES

4. 2 PHYSIOLOGIE DE L'APPAREIL VESTIBULAIRE

A. ACTIVATION DES RÉCEPTEURS VESTIBULAIRES

L'appareil vestibulaire est sensible à la gravité et à l'accélération. Il a pour fonction de repérer la position de la tête dans l'espace et de détecter ses déplacements.

Sur un fond d'activité continue, due à la force de gravité omniprésente viennent se superposer des stimulations produites lors des mouvements de la tête. Ces mouvements peuvent se décomposer en :

- Accélérations linéaires (déviation de la position de la tête par rapport à la verticale) détectées par les macules.
- Accélérations angulaires détectées par les récepteurs des canaux semi-circulaires.

Chaque cellule ciliée, qu'elle soit cupulaire ou maculaire, contient de nombreux petits cils et un cil plus gros appelé kinocil. Celui-ci se situe sur un côté de la cellule ciliée. C'est lui qui détecte le sens du mouvement endolympatique et conditionne ainsi le type de décharge du nerf vestibulaire : l'inclinaison des autres cils vers le kinocil stimule la cellule, leur inclinaison de l'autre côté l'inhibe.

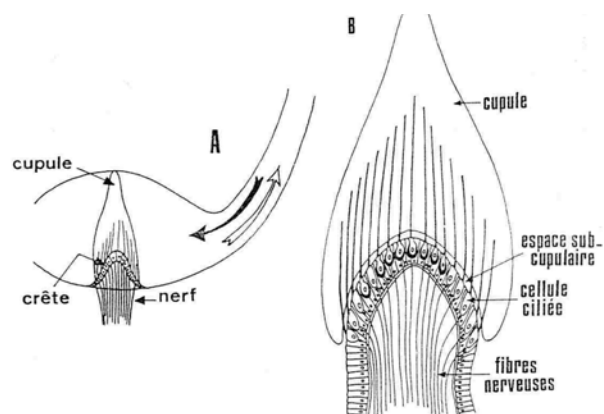
Les cellules ciliées de l'ampoule des canaux semi-circulaires sont toutes orientées dans le même sens, avec le kinocil du côté de l'utricule et les petits cils du côté du corps du canal semi-circulaire. Tout mouvement du liquide dirigé vers l'ampoule (ampullipète) entraîne une dépolarisation des cellules ciliées et donc une stimulation du nerf vestibulaire. Au contraire ; tout mouvement liquidien ampullifuge entraîne une hyperpolarisation des cellules ampullaires et donc une inhibition du nerf vestibulaire.

Pour le récepteur maculaire, l'orientation de l'axe cilié n'est pas le même. Leur kinocil est orienté vers le striola ; de telle sorte qu'un mouvement liquidien dans un sens entraîne la dépolarisation d'un certain nombre d'entre elles et l'hyperpolarisation d'autres cellules et reste sans effet sur un troisième groupe d'entre elles. À partir de cet ensemble complexe d'activité, le cerveau est informé de la position exacte de la tête.

B. ACTIVITÉ ET RÔLE DES CANAUX SEMI-CIRCULAIRES (CSC)

* Réponses du canal semi-circulaire à des accélérations angulaires (rotation)

Au début de la rotation (accélération), du fait de l'inertie, l'endolymphe des conduits semi-circulaires met du retard pour suivre le déplacement du canal semi-circulaire. De ce fait, on considère qu'elle se déplace relativement dans la direction opposée à celle de la rotation du corps. Comme les axes des cellules sensorielles sont opposés dans les conduits semi-circulaires des deux oreilles, la rotation dans une direction donnée : exp. de la gauche vers la droite, provoque une dépolarisation des récepteurs csc droits et une hyperpolarisation des récepteurs des csc gauches. Si la rotation du corps se poursuit à un rythme constant, l'endolymphe finit par s'immobiliser (par se déplacer à la même vitesse que le corps) et la stimulation des cellules sensorielles s'arrête aussi bien dans les canaux semi-circulaires droits que gauche. Par conséquent, après les premières secondes d'une rotation continue effectuée, les yeux bandés, nous ne pouvons déterminer si nous nous déplaçons à vitesse constante ou si nous sommes immobiles. Si nous nous arrêtons soudainement, le déplacement de l'endolymphe se poursuit, mais en sens inverse. Cette inversion soudaine de la courbure des cils modifie la fréquence de décharge des cellules réceptives ce qui indique au cerveau que nous nous sommes arrêtés.



Représentation demi-schématique de l'épithélium sensoriel d'une macule. Le faisceau de cils situé à la partie apicale des cellules ciliées est représenté par un seul prolongement.

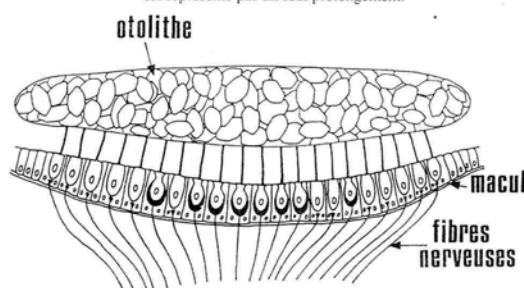


Fig.3. Mode de stimulation des récepteurs labyrinthiques.

* les réflexes vestibulo-oculomoteurs

Les influx nerveux provenant des conduits semi-circulaires jouent un rôle important dans les mouvements réflexes des yeux.

Au niveau oculaire, on constate au début de la rotation une déviation lente des yeux dans le sens opposé à la rotation, suivie d'une secousse rapide de rappel dans le même sens que la rotation. L'ensemble de ce réflexe vestibulo-oculaire est appelé nystagmus ; son sens est défini cliniquement par la composante rapide de ce réflexe.

C. ACTIVITÉ ET RÔLE DE L'UTRICULE ET DU SACCULE

* Fonctionnement

Au repos, la plupart des fibres provenant des cellules ciliées maculaires déchargent à une fréquence de base : activité de repos. Au niveau d'une cellule donnée, l'inclinaison latérale du côté du kinocil entraîne une augmentation de la fréquence des influx, l'inclinaison controlatérale fait décroître cette fréquence souvent jusqu'à son arrêt. L'inclinaison des cils est due aux mouvements de la tête dans l'espace et au poids des otolithes dont la densité est trois fois supérieure à celle des tissus environnants.

Les macules utriculaires sont stimulées par les mouvements de la tête d'avant en arrière. Les macules sacculaires sont stimulées par les mouvements latéraux.

* Rôle de l'utricule et du saccule

Dans l'utricule, la macule est horizontale et les cils sont orientés verticalement lorsque la tête est droite. La macule de l'utricule réagit surtout à l'accélération dans le plan horizontal et à la flexion latérale de la tête ; car les mouvements verticaux ne remuent pas sa membrane des otolithes.

Dans le saccule, la macule est presque verticale, et les cils sont horizontaux. La macule du saccule réagit surtout aux mouvements verticaux comme l'accélération soudaine d'un ascenseur.

Les récepteurs maculaires sont également sensibles aux mouvements rotatoires à vitesse constante.

Les macules ont donc fonction de conserver à la tête une position normale par rapport à la force gravitaire. Elles participent aussi à l'équilibre dynamique en réagissant aux variations de l'accélération linéaire.

4.3 LES CONNEXIONS VESTIBULAIRES

A. LES NERFS VESTIBULAIRES

Les trois nerfs ampullaires, le nerf utriculaire et le nerf sacculaire se réunissent pour former le nerf vestibulaire. Le corps cellulaire des fibres afférentes est localisé dans un ganglion vestibulaire ou ganglion de Scarpa. Le nerf vestibulaire constitue une partie du VIII^e nerf crânien (l'autre partie étant le nerf cochléaire).

B. LES NOYAUX VESTIBULAIRES

Les fibres myélinisées afférentes en provenance du système vestibulaire projettent sur quatre noyaux vestibulaires situés dans le bulbe : le noyau vestibulaire latéral ou de Deiters, le noyau vestibulaire médian, le noyau vestibulaire inférieur.

* Le noyau vestibulaire latéral : Noyau de Deiters

Le noyau de Deiters reçoit les afférences vestibulaires en provenance de la macule utriculaire. De ce noyau partent les fibres à l'origine du faisceau vestibulo-spinal latéral qui a un effet excitateur sur les motoneurones α et γ des muscles antigravitaires ipsilatéraux (chez l'homme, les extenseurs des jambes et les fléchisseurs des bras). Ce noyau est impliqué dans les réactions statiques d'équilibration.

* Le noyau vestibulaire inférieur

Ce noyau reçoit des informations sensibles des macula-sacculaires et utriculaires et des crêtes ampullaires. Il reçoit également des informations du vermis médian du cervelet. Par ces efférences, il transmet des informations vers la moelle épinière par les faisceaux vestibulo et réticulo-spinaux vers le cervelet et vers le thalamus.

Ce noyau semble intégrer les informations vestibulaires et cérébelleuses pour les transmettre vers les structures nerveuses supérieures. Ils interviennent donc dans les réactions d'équilibration dynamiques et statiques.

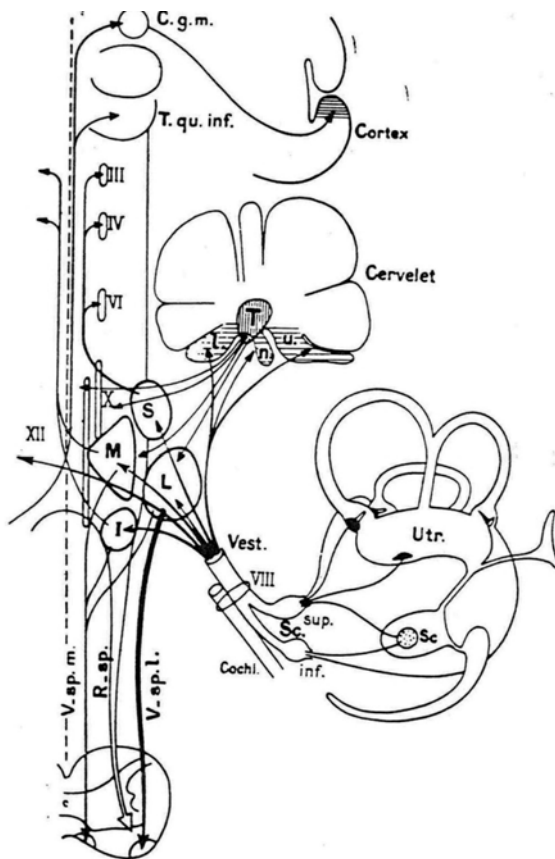
* Les noyaux vestibulaires médian et supérieur

Ces noyaux reçoivent essentiellement des informations en provenance des crêtes ampullaires, ils projettent sur les noyaux oculomoteurs et sur les noyaux moteurs nucaux. Ils sont impliqués dans les réflexes vestibulo-oculaires.

Les noyaux vestibulaires constituent le principal centre d'intégration de l'équilibre, reçoivent aussi des influx des récepteurs visuels et des propriocepteurs situés dans les muscles du cou qui détectent l'inclinaison de la tête. Les noyaux vestibulaires intègrent des données puis envoient des ordres aux centres moteurs du tronc cérébral qui contrôlent les muscles de l'œil et les mouvements réflexes des muscles du cou et des membres.

Les mouvements réflexes des yeux et du corps produits par ces muscles nous permettent de conserver un point de fixation et d'adapter notre position de manière à préserver ou à rétablir notre équilibre.

Fig.4. les connexions vestibulaires.



L'appareil vestibulaire et ses voies efférentes.

C.g.m. : corps genouillés médians; T.qu.inf. : tubercules quadrijumeaux inférieurs; T : noyau du toit; l : lingula; n : nodulus; u : uvula; S : noyau de Bechterew; M : noyau de Schwalbe; L : noyau de Deiters; I : noyau de Roller; Vest. : noyau vestibulaire; Utr. : utricule; sc. : saccule; Sc. : ganglion de Scarpa; Cochl. : nerf cochléaire; V-sp.m. : faisceau vestibulo-spinal médian; R-sp. : faisceau réticulo-spinal; V-sp.l. : faisceau vestibulo-spinal latéral

4. 4 ÉVALUATION CLINIQUE DU SYSTÈME VESTIBULAIRE

A. RECHERCHE D'UNE ATAXIE STATIQUE

* Épreuve de Romberg

Consiste à observer l'équilibre du sujet en position debout les pieds joints, les yeux ouverts puis fermés.

En cas de mauvais fonctionnement du système d'équilibration utriculaire, on observe après un bref délai suivant l'occlusion des yeux, une latéropulsion toujours du côté de la lésion pouvant aboutir à la chute. Ce signe est encore appelé signe de Romberg labyrinthique. Il se distingue du vrai signe de Romberg qui se voit en cas d'atteinte proprioceptive et qui est caractérisé par des oscillations en tous sens aboutissant à la chute lors de la fermeture des yeux.

* Épreuve de la déviation des index

Le sujet tient les bras tendus, index en face de ceux de l'examineur. Il se produit lors de la fermeture des yeux une déviation latérale des deux index vers le côté lésé.

B. RECHERCHE D'UNE ATAXIE LOCOMOTRICE

- La marche se fait avec une latéropulsion vers le côté lésé et par suite des efforts de correction, celle-ci se fait en zigzag.
- La marche aveugle, tantôt en avant, tantôt en arrière, réalise une étoile, car la déviation se fait vers le côté lésé lors de la marche en avant et l'inverse lors de la marche en arrière.

C. TEST CALORIQUE

Ce test permet d'explorer chaque appareil vestibulaire indépendamment de l'autre.

L'injection d'eau chaude (44 °C) dans le conduit auditif interne droit entraîne un mouvement de convection ascendant de l'endolymphe (ampullipète) à l'origine de la dépolarisation de ce canal. Le malade étant placé allongé, tête et tronc relevés de 30 °, le canal externe droit est alors vertical et il est le seul stimulé. Cette activation est à l'origine d'un réflexe vestibulo-oculomoteur avec un nystagmus battant du côté droit.

Une injection d'eau froide dans le csc droit, entraîne un mouvement de convection descendant, ampullifuge qui diminue l'activité de ce canal et donc du nerf vestibulaire droit.

Il en résulte une réaction d'inhibition qui aboutit à un nystagmus battant du côté opposé à la stimulation c'est-à-dire à gauche.

5. AUTRES FACTEURS DE L'ÉQUILIBRE

5.1 LES PROPRIOCEPTEURS DU COU

L'appareil vestibulaire ne détecte que l'orientation et les mouvements de la tête.

Les autres centres nerveux reçoivent aussi des informations sur l'orientation de la tête par rapport au reste du corps et sur la position des différentes parties du corps entre elles. Ces informations sont transmises par les propriocepteurs du cou et du reste du corps directement jusqu'aux noyaux vestibulaires et réticulaires du tronc cérébral et indirectement par l'intermédiaire du cervelet.

Les informations proprioceptives les plus importantes pour l'équilibration, et de loin, sont celles qui proviennent des propriocepteurs du cou, car elles renseignent le système nerveux sur l'orientation de la tête par rapport au corps. Lors de l'inclinaison de la tête par flexion-extension ou inclinaison latérale du cou, les influx provenant des propriocepteurs empêchent les appareils vestibulaires de donner au sujet une sensation de déséquilibre. Ils émettent pour cela des signaux s'opposant exactement aux signaux d'origine vestibulaire.

À l'opposé, lorsque c'est l'ensemble du corps qui change de position, les influx vestibulaires ne sont pas inhibés par les propriocepteurs cervicaux. Le changement de position est alors perçu comme un déséquilibre et déclenche les mécanismes compensateurs.

5.2 INFORMATIONS PROPRIOCEPTIVES ET EXTÉROCEPTIVES PROVENANT D'AUTRES PARTIES DU CORPS

Ces informations sont nécessaires au maintien de l'équilibre, parce que des ajustements doivent s'effectuer quand le corps s'incline au niveau du thorax, de l'abdomen ou d'ailleurs. Il est probable que toutes ces informations s'additionnent algébriquement dans le cervelet, la substance réticulaire du tronc cérébral et entraînent ainsi les ajustements adéquats des muscles posturaux.

Plusieurs sensations extéroceptives jouent également un rôle important dans le maintien de l'équilibre. Par exemple, la sensation de pression sur la plante des pieds informe le système nerveux de la distribution du poids entre les deux pieds et de la localisation du poids en avant ou en arrière du pied.

5.3 INFORMATIONS VISUELLES

Après destruction complète des appareils vestibulaires et même après la perte de la plupart des informations proprioceptives du corps, un individu peut encore utiliser efficacement ses mécanismes visuels pour maintenir son équilibre. Le sens de la vue contrôle non seulement les attitudes du corps et des membres, mais il prévoit les conditions du maintien de l'équilibre dans l'accomplissement des mouvements qui vont s'effectuer. À cet égard l'information optique peut aider les centres de l'équilibre à prévoir que l'individu perdra son équilibre avant que ceci ne se produise, si les corrections appropriées ne sont pas immédiatement apportées.

De nombreux individus dont les appareils vestibulaires sont complètement détruits ont un équilibre presque normal tant que leurs yeux restent ouverts et qu'ils effectuent tous leurs mouvements avec lenteur. Mais lorsqu'ils bougent rapidement ou qu'ils ferment les yeux, ils perdent immédiatement l'équilibre.

CONCLUSION

Au cours des mouvements, l'ensemble des sensibilités participe à la régulation de la posture et à l'équilibration du corps.

Un mouvement de la tête ne se produit jamais dans un plan strictement horizontal ou vertical et les accélérations auxquelles la tête est soumise lors de ces déplacements ont, dans la plupart des cas, une composante linéaire et une composante angulaire. Ce sont donc tous les récepteurs vestibulaires qui sont stimulés. Par ailleurs, un mouvement de la tête dans l'espace est aussi un mouvement de la tête par rapport au tronc ; ce qui met en jeu les récepteurs proprioceptifs cervicaux. De plus un déplacement de la tête met en jeu les récepteurs visuels, du fait du déplacement des images du monde environnant sur la rétine. Enfin, un déplacement du corps mobilise les récepteurs tactiles et les récepteurs proprioceptifs dans leur ensemble. Les messages issus de tous ces récepteurs parviennent au système nerveux central qui, par l'intermédiaire des muscles, assure la régulation posturale et les réactions d'équilibration adaptées à la situation.

LE CERVELET

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. Représenter l'organisation somatotopique du corps à la surface du cervelet.
2. Décrire le fonctionnement du cortex cérébelleux.
3. Indiquer la classification fonctionnelle du cervelet
4. Citer les connexions de chaque zone cérébelleuse
5. Préciser le rôle de chaque zone dans le contrôle de la motricité.

PLAN

1. INTRODUCTION

2. ORGANISATION DU CERVELET

3. FONCTIONNEMENT DU CERVELET

4. CONNEXIONS CÉRÉBELLEUSES

5. RÔLE DU CERVELET DANS LE CONTRÔLE DU MOUVEMENT

1. INTRODUCTION

Le cervelet est situé en dérivation sur les grandes voies de la sensibilité et de la motricité. Son ablation ne provoque ni paralysie ni perte de sensibilité, et sa stimulation n'engendre aucun mouvement ni aucune sensation. Toutefois, les lésions cérébelleuses entraînent des troubles importants de la coordination motrice, alors que la stimulation du cervelet provoque des modifications dans le dérouls du mouvement.

De nos jours, le cervelet est considéré comme l'une des structures nerveuses indispensables à la régulation de l'équilibration, du tonus musculaire et de la coordination des mouvements volontaires.

2. ORGANISATION DU CERVELET

2.1 ORGANISATION FONCTIONNELLE

Selon une subdivision longitudinale et fonctionnelle, le cervelet est divisé en une partie centrale : le vermis médian, et deux parties latérales : les hémisphères cérébelleux.

A- LA PARTIE CENTRALE VERMIENNE

Elle constitue le vermis médian, et contrôle essentiellement l'activité des muscles axiaux du cou, des épaules et des hanches, elle intervient donc dans le contrôle de la posture et de l'équilibration.

B- LA PARTIE INTERMÉDIAIRE

Cette zone contrôle les contractions musculaires dans les parties distales des mains, des doigts et des pieds. Elle joue donc, un rôle important dans la coordination des mouvements des membres.

C- LA ZONE LATÉRALE

Elle correspond aux hémisphères cérébelleux, participe à l'organisation de l'ensemble des séquences motrices et à la coordination des mouvements.

2.2 REPRÉSENTATION SOMATOTOPIQUE

Le cervelet contient deux représentations somatotopiques.

L'une sur le lobe antérieur

L'autre sur le lobe postérieur

La partie axiale du corps est représentée dans la région du vermis, les membres et la tête dans la partie intermédiaire des hémisphères cérébelleux

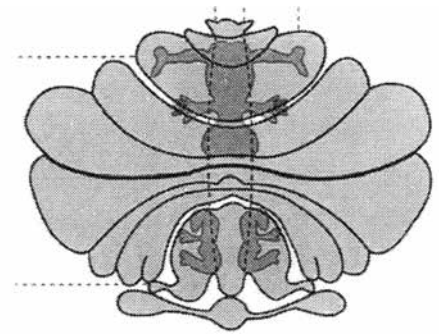


Fig.1. Représentation somatotopique au niveau du cervelet

2.3 LES NOYAUX CÉRÉBELLEUX

Ils sont en nombre de trois enfouis en profondeur dans la masse cérébelleuse.

A. NOYAUX FASTIGIAUX

Ils font partie de l'archéo-cérébellum et sont situés dans le vermis, derrière le toit du 4e ventricule. Ils sont étroitement associés à l'appareil vestibulaire.

B- NOYAUX DENTELÉS

Ils font partie du néo-cérébellum et sont situés à la partie antéro-interne de chaque hémisphère. Ils sont en relation avec la zone latérale des hémisphères cérébelleux.

C- NOYAUX INTERPOSÉS

Ils appartiennent au paléo-cérébellum et sont en relation avec la zone intermédiaire des hémisphères cérébelleux.

3. FONCTIONNEMENT DU CERVELET

Les efférences des cellules de Purkinje destinées aux noyaux profonds sont entièrement inhibitrices. Ainsi, les cellules des noyaux profonds sont stimulées par des collatérales provenant des fibres grimpantes et moussues et au contraire inhibées par les signaux provenant des cellules de Purkinje.

Il existe normalement un équilibre permanent entre ces deux effets, de sorte que les signaux émis par les cellules des noyaux profonds restent relativement stables. Au cours de l'exécution d'un mouvement rapide, l'excitation des noyaux précède leur inhibition de quelques millisecondes. Ainsi des signaux excitateurs et inhibiteurs très rapides sont envoyés dans les voies motrices pour ajuster la commande du mouvement. La composante inhibitrice retardée de ces signaux permet d'assurer un amortissement efficace. L'excitation du système moteur est suivie d'une rétroaction négative interrompant le mouvement avant qu'il ne dépasse son but.

En plus des grains et des cellules de Purkinje, le cortex cérébelleux contient les cellules en panier, les cellules étoilées et les cellules de Golgi qui sont toutes inhibitrices. Les cellules en panier et les cellules étoilées sont excitées par les fibres parallèles dans la couche moléculaire. Elles inhibent de façon latérale les cellules de Purkinje adjacentes, ce qui permet d'affiner le signal. Les cellules de Golgi sont également stimulées par les fibres parallèles de la couche moléculaire, mais leur inhibition s'exerce non sur les cellules de Purkinje, mais sur les grains. Elles fonctionnent donc comme un circuit de rétrocontrôle négatif empêchant l'amplification exagérée des signaux afférents.

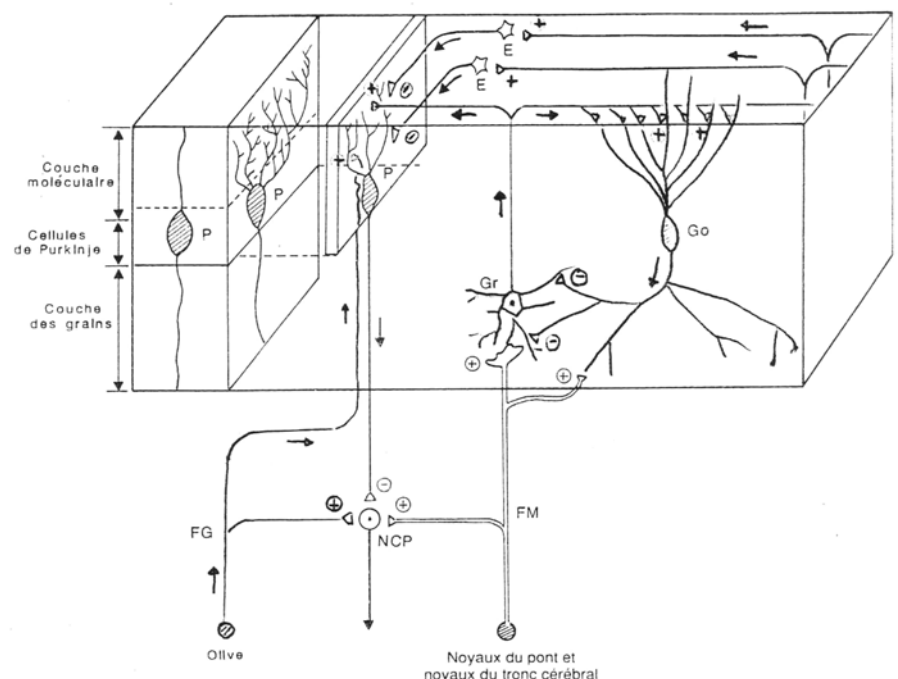


Fig.2. Interactions cellulaires dans le cortex cérébelleux

4. CONNEXIONS CÉRÉBELLEUSES

4.1 LES AFFÉRENCES

A. AFFÉRENCES MOTRICES

- * le faisceau cortico-cérébelleux constitue l'une des plus importantes afférences cérébelleuses. Elle provient du cortex moteur et gagne par les noyaux du pont et les faisceaux ponto-cérébelleux, le cortex cérébelleux controlatéral.
- * Le faisceau olivo-cérébelleux reliant l'olive bulbaire au cervelet controlatéral par l'intermédiaire des fibres grimpantes. Cette voie est excitée par des fibres provenant du cortex moteur, des noyaux gris, de la formation réticulée et de la moelle.
- * Les fibres vestibulo-cérébelleuses se terminant dans le lobe flocculonodulaire et le noyau du toit.
- * Les fibres réticulo-cérébelleuses reliant la réticulée au vermis.

B. AFFÉRENCES SOMESTHÉSIQUES

Elles proviennent de la périphérie, transitent dans la moelle par l'intermédiaire des faisceaux spino-cérébelleux dorsal et ventral et gagnent l'hémicervelet homolatéral, le dorsal passant par le pédoncule cérébelleux inférieur et le ventral par le pédoncule cérébelleux supérieur.

Les influx empruntant ces voies proviennent des fuseaux neuromusculaires des organes tendineux de Golgi, des gros récepteurs tactiles cutanés et des récepteurs articulaires. Tous ces récepteurs informent à chaque instant le cervelet sur le degré de contraction musculaire, de tension des tendons, sur la position et les vitesses des différents segments du corps. Le cervelet dispose ainsi en permanence d'informations sur l'état physique de l'organisme. La vitesse de conduction du faisceau spino-cérébelleux dépasse 100 m/s, ce qui est en fait la plus rapide des voies du système nerveux central. Cette rapidité est essentielle pour que le cervelet soit informé à chaque instant des modifications proprioceptives de l'organisme.

4.2 LES EFFÉRENCES

Toutes les voies efférentes passent par les noyaux profonds du cervelet. On peut distinguer trois groupes d'efférences :

- * Une première voie prend naissance dans le cortex de la zone latérale des hémisphères cérébelleux, gagne le noyau dentelé, puis le noyau ventro-latéral du thalamus et enfin le cortex moteur. Cette voie joue un rôle essentiel dans la coordination des mouvements volontaires.
- * Une seconde voie efférente partant du vermis passe par le noyau fastigial pour gagner le bulbe. Ce circuit fonctionne en association avec les structures de l'équilibration et contribue au contrôle de l'équilibre et du tonus postural.
- * Une troisième voie prend naissance dans la zone intermédiaire de l'hémisphère cérébelleux et fait relais dans le noyau interposé. Elle a une triple direction :
 - * Vers le noyau interposé, puis le noyau ventro-latéral du thalamus et enfin le cortex moteur.
 - * Vers les structures médianes du thalamus puis les noyaux gris.
 - * Vers le noyau rouge et la formation réticulée.

Le rôle de ce circuit est de coordonner le fonctionnement des deux premières voies efférentes ; c'est-à-dire d'harmoniser la régulation posturale avec la commande motrice volontaire d'origine corticale.

5. RÔLE DU CERVELET DANS LE CONTRÔLE DU MOUVEMENT

Le rôle du cervelet a été défini à partir d'expérimentations animales et de constatations cliniques chez l'homme. En effet, l'ablation totale du cervelet se traduit par des désordres portant sur l'équilibre, la régulation posturale et l'exécution des mouvements intentionnels.

5.1 RÔLE DU CERVELET DANS LE CONTRÔLE DE L'ÉQUILIBRE

La perte des lobes flocculo-nodulaires et du vermis s'accompagne de troubles importants de l'équilibre, de nausées et un nystagmus prononcé. Ces lobes sont impliqués dans les réactions posturales d'équilibration, surtout lors des mouvements rapides. Ils participent à l'ajustement des contractions des muscles agonistes et antagonistes au cours des changements rapides de position effectués à la demande des récepteurs vestibulaires, mais aussi, des fuseaux neuromusculaires.

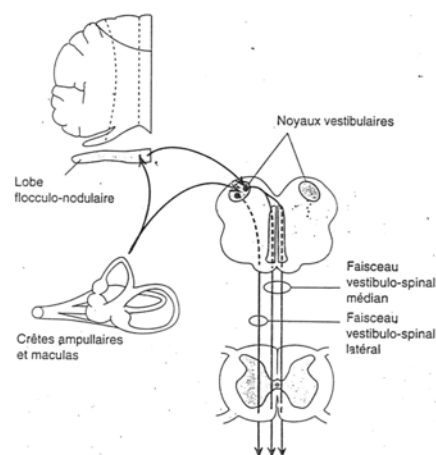


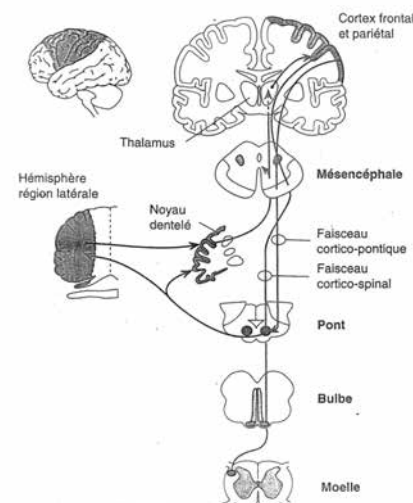
Fig.3. rôle du cervelet dans le contrôle de l'équilibration

5.2 RÔLE DU CERVELET DANS LA PROGRAMMATION DU MOUVEMENT

Le cervelet « cérébral » correspondant à la zone latérale des hémisphères des lobes antérieurs et postérieurs. Il intervient dans la genèse du mouvement, au moment de sa programmation. Avec la participation des noyaux gris de la base, il traite les informations provenant du cortex associatif dans le but de planifier le mouvement.

Le résultat de ce traitement serait ensuite transmis aux aires corticales pré-motrices et motrices responsables de l'exécution du mouvement.

Fig.3. fonction de la zone latérale du cervelet

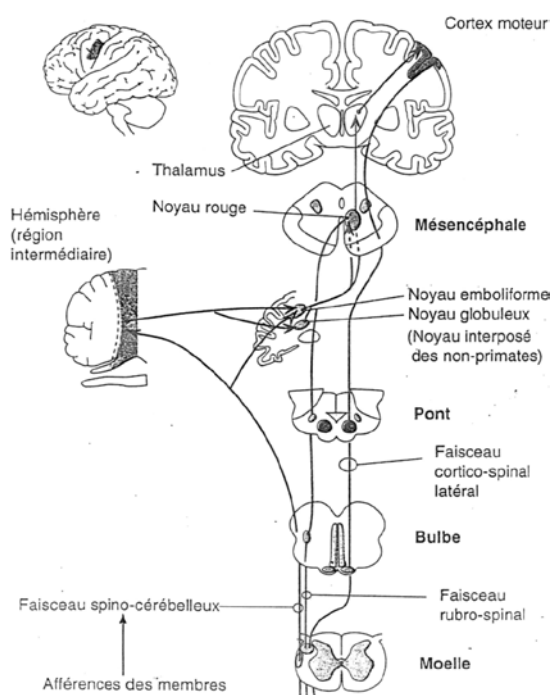


5.3 RÔLE DU CERVELET DANS L'EXÉCUTION DU MOUVEMENT

C'est la zone intermédiaire du cortex cérébelleux qui est responsable de l'exécution des mouvements volontaires réalisée par la contraction harmonieuse des muscles distaux des membres.

Étant en relation étroite avec les aires corticales motrices et les récepteurs périphériques, cette partie du cervelet joue le rôle de « détecteur d'erreurs », en comparant la commande motrice centrale avec les informations périphériques. La comparaison de ces deux données lui fournit des indications pour la programmation du mouvement suivant. S'il détecte une erreur, il peut modifier la commande motrice destinée à la musculature distale.

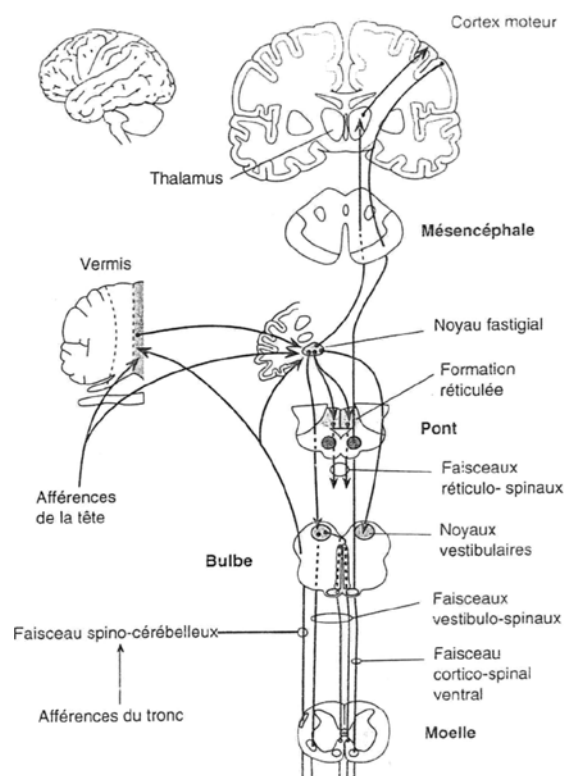
Fig.4. rôle du cervelet dans la motricité volontaire



6.4 RÔLE DU CERVELET DANS LA RÉGULATION DU TONUS MUSCULAIRE

Les noyaux du cervelet ont une influence facilitatrice sur les motoneurones spinaux. Ils ont donc une action positive sur le tonus musculaire. Les cellules de Purkinje viennent modérer cette tendance hypertonique en exerçant une influence inhibitrice sur ces noyaux. Après ablation du cervelet, il y a disparition de l'influence facilitatrice des noyaux et l'hypotonie est la règle.

Fig.5. rôle du cervelet dans le contrôle du tonus musculaire.



FONCTIONS MOTRICES DES NOYAUX GRIS DE LA BASE

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. Décrire la structure et les connexions des noyaux gris.
2. Établir le rôle des N.G.B. dans la motricité et le tonus musculaire.
3. Expliquer les liens neurochimiques des noyaux gris et leur rôle dans la pathologie humaine.

PLAN

1. STRUCTURE DES NOYAUX GRIS
 2. CONNEXIONS DES NOYAUX GRIS
 3. RÔLE DES NOYAUX GRIS DANS LA RÉGULATION DU MOUVEMENT
 4. RÔLE DES NOYAUX GRIS DANS LA RÉGULATION DU TONUS MUSCULAIRE
 5. ORGANISATION NEUROCHIMIQUE DES NOYAUX GRIS
 6. ÉLÉMENTS DE PHYSIOPATHOLOGIE
- CONCLUSION

1. STRUCTURE DES NOYAUX GRIS

Les noyaux gris centraux, appelés encore ganglions de la base, sont constitués de trois gros noyaux : **noyau caudé, putamen, pallidum**.

Noyaux caudé et putamen, d'origine télencéphalique, constituent le **néostriatum** alors que le pallidum, d'origine diencéphalique, constitue le **paléostriatum**.

À ces structures on peut associer d'autres structures qui leur sont connectées substance noire (locus niger), noyau sub thalamique (corps de Luys), ainsi que certains noyaux thalamiques et réticulaires. L'ensemble de ces structures sont liées entre elles par des connexions très complexes, et d'autre part en relation avec d'autres structures nerveuses participant à la régulation de la motricité.

2. CONNEXIONS DES NOYAUX GRIS

2.1 BOUCLE CORTICO-STRIATO-THALAMO-CORTICALE

Elle part du cortex cérébral, arrive au noyau caudé et au putamen, puis au pallidum, puis aux noyaux ventraux du thalamus. À partir du thalamus, cette voie se termine dans le cortex cérébral.

Les principales sorties des noyaux gris s'effectuent vers le thalamus (noyaux **VA**, **VL** et **CM**) et le cortex par le globus pallidus médian (**GPM**) et son équivalent mésencéphalique, la substance noire réticulée (**SNr**).

- **Une voie directe** associe le néostriatum au **GPM** et à la **SNr**. Les neurones nigrostriés impliqués dans cette voie libèrent du GABA et la substance P sur les neurones du GPM SNr. Ces connexions sont inhibitrices. Les neurones du GPM SNr projettent ensuite sur les noyaux centro médian, ventral et antérieur du thalamus. Cette connexion est également GABA-énergique et inhibitrice. Enfin les noyaux thalamiques projettent vers le cortex préfrontal, moteur et la connexion est excitatrice.

Les noyaux thalamiques sont constamment soumis à l'inhibition des neurones du GPM SNr.

L'activation des connexions cortico-nigrostriées lève cette inhibition.

Le thalamus active alors les aires prémotrices et supplémentaires corticales facilitant la réalisation d'un mouvement.

- **Une voie indirecte** passe par le globus pallidus latéral (**GPL**) puis le subthalamus (**STN**) pour retourner sur le **GPM** et de là, atteindre le thalamus puis le cortex cérébral.

Les efférences pallidales sont inhibitrices (**GABA**), ainsi que les efférences de la partie réticulée de la substance noire. Les neurones néostriés de cette voie contiennent du GABA associé à des enképhalines, ces neurones inhibent les neurones du GPL ces derniers sont GABA-énergiques et inhibent à leur tour les neurones du STN. La succession de ces deux inhibitions fait que l'activation cortico-nigrostriée désinhibe le STN. Les neurones sub thalamiques, glutamatergiques excitent le GPM SNr ce qui est exactement l'inverse de ce que fait la voie directe. La mise en jeu de cette voie aura pour conséquence de dysfaciliter la réalisation du mouvement.

En plus de ces deux voies (directes et indirectes) la SNc est à l'origine d'une voie dopaminergique nigro-néostriée. Les effets de cette voie sur les neurones néostriés dépendent du type de neurones cibles :

- Les neurones GABA-érgiques à substance P (voie directe) sont excités par la dopamine.
- Les neurones GABA-érgiques à enképhalines (voie indirecte) sont inhibés.

Ces deux effets se conjuguent pour faciliter la réalisation d'un mouvement puisque la voie directe, facilitatrice du mouvement est activée et la voie indirecte, dysfacilitatrice du mouvement est inhibée.

2.2 LES VOIES NIGRO-STRIATALES

Il existe des connexions réciproques entre la substance noire et le striatum. La voie nigrostriatale libère de la dopamine dans le striatum. La voie striatonigrique libère du **GABA** et de la substance **P** dans la substance noire. Le noyau caudé reçoit également d'importantes projections en provenance du cortex cérébral, des noyaux du raphé.

2.3- LES VOIES EFFÉRENTES VERS LE TRONC CÉRÉBRAL

Les noyaux gris contrôlent les fonctions motrices du tronc cérébral. Ces voies proviennent du pallidum et arrivent au niveau du tronc cérébral par des relais dans le noyau sub thalamique et la substance noire ; elles contrôlent l'excitabilité des motoneurones α et γ de la corne antérieure de la moelle épinière.

3. CONNEXIONS AVEC LES NOYAUX INTERLAMINAIRES DU THALAMUS

Cette voie va du néostriatum vers le pallidum, les noyaux intralaminaires et retourne au néostriatum.

Donc d'une manière schématique, on peut dire que les noyaux gris de la base sont en relation étroite d'une part, avec le cortex cérébral et modulent l'activité pyramidale des aires motrices corticales ; et d'autre part avec les structures du tronc cérébral et influencent l'activité des motoneurones α et γ . Ils jouent donc un rôle important dans la régulation du tonus d'expression et des mouvements volontaires.

4. RÔLE DES NOYAUX GRIS DANS LA RÉGULATION DU MOUVEMENT

Recevant des afférences du cortex associatif ; qui jouent un rôle important dans la conception du mouvement, ils participent à l'élaboration du programme moteur, c'est à dire à l'élaboration des messages nerveux organisés selon des séquences spatio-temporelles déterminées, messages qui sont transmis par l'intermédiaire du thalamus aux aires corticales qui déclencheront l'exécution du mouvement. Ils jouent, un rôle à la fois dans l'initiation et dans la régulation de la motricité.

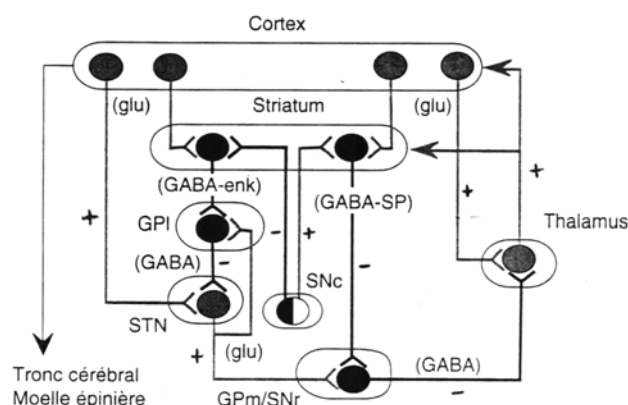
En effet, des enregistrements de l'activité des noyaux gris, réalisés chez le singe éveillé en réponse à des mouvements appris, ont mis en évidence qu'un certain nombre de neurones déchargent avant l'exécution du mouvement et avant que les neurones du cortex moteur ne soient mis en activité.

En plus ces noyaux sont capables de piloter certains programmes sans intervention du cortex moteur. Des expériences réalisées sur des animaux, sans cortex ont montré qu'ils sont capables d'une certaine motricité assez complexe. Ainsi, un chat sans cortex moteur peut marcher, s'alimenter, avoir des comportements agressifs. Donc le cortex cérébral.

5. RÔLE DES NOYAUX GRIS DANS LA RÉGULATION DU TONUS MUSCULAIRE

Une fonction importante des noyaux gris centraux est l'inhibition diffuse du tonus musculaire. Cette inhibition passe par le cortex cérébral et le tronc cérébral. C'est la suppression de cette inhibition qui est responsable de la rigidité de décérébration observée après section du tronc cérébral au niveau du mésencéphale. Cette action s'exerce par les voies qui partent du pallidum et agissent sur la formation réticulaire et les voies réticulospinales qui contrôlent l'activité des muscles axiaux et proximaux. Ils jouent donc, un rôle capital dans le contrôle de la posture de manière à permettre, une fois le corps stabilisé, aux mouvements fins des extrémités de s'effectuer avec précision.

Fig.1. Rôle du noyau gris de la base dans la régulation de la motricité



6. ÉLÉMENTS DE PHYSIOPATHOLOGIE

Il existe plusieurs situations pathologiques chez l'homme au cours desquelles des lésions des noyaux gris ont été mises en évidence.

6.1 LA MALADIE DE PARKINSON

C'est la plus fréquente des maladies des noyaux gris : cliniquement, elle se caractérise par l'association d'une rigidité musculaire (hypertonie), d'un tremblement d'une fréquence de 4 à 6 Hz et d'une akinésie ou une bradykinésie (impossibilité ou très grande lenteur à l'initiation du mouvement volontaire).

Cette maladie est due à la dégénérescence de la voie dopaminergique nigrostriée ; qui entraîne une diminution de l'activité des neurones du cortex moteur par hypoexcitation responsable de la bradykinésie.

La dégénérescence de la voie dopaminergique nigrostriée provoque au niveau du striatum une hyperactivité des interneurons cholinergiques. Cette altération de l'équilibre dopamine/acétylcholine serait responsable de l'apparition des symptômes. Ceci explique l'efficacité des drogues anticholinergiques dans le traitement de cette maladie. Actuellement les patients sont traités par le précurseur de la dopamine, la L. Dopa qui traverse la barrière hémato-encéphalique et améliore considérablement les troubles du Parkinson.

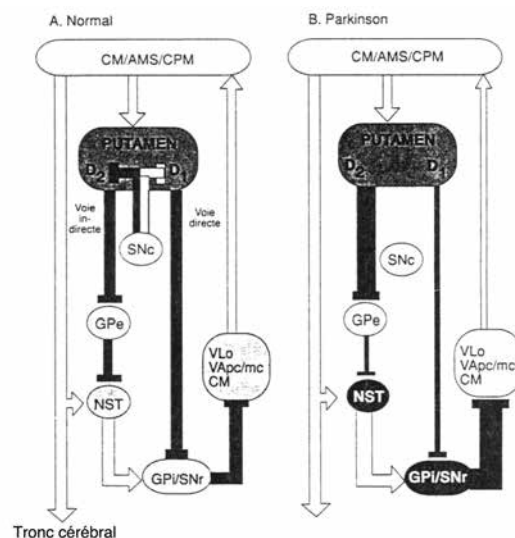


Fig.2. Physiopathologie de la maladie de Parkinson

6.2 CHOREE DE HUNTINGTON

Elle se manifeste par des mouvements involontaires, incoordonnés lents des extrémités. C'est une maladie qui présente une hérédité autosomique dominante qui s'exprime vers l'âge de 30-40 ans. Cette affection qui se traduit au début par des mouvements anormaux s'accompagne au bout de quelques années d'un état démentiel. Elle est due à une dégénérescence des interneurons cholinergiques intrastriataux et des neurones GABA-ergique striato-nigrique. Elle se caractérise donc par une activité accrue des neurones du cortex moteur.

6.3 LE BALLISME

Il est la conséquence de la lésion du noyau subthalamique, souvent due à un accident vasculaire aigu. Il correspond à des mouvements involontaires, brusques, violents de grande amplitude touchant des segments entiers du corps.

CONCLUSION

Les mouvements anormaux sont le premier exemple de défaut comportemental pour lequel un lien a pu être établi avec un déficit cellulaire et moléculaire.

L'hyper ou l'hypokinésie sont dues à une altération ou à une perte de neurones de projections néostriés. Pour les mouvements anormaux hyperkinétiques ; c'est le fonctionnement du subthalamus qui est altéré. La conséquence est une augmentation de l'activité dans la voie thalamo-corticale. L'hypokinésie parkinsonienne serait au contraire la conséquence d'une diminution de l'activité de cette même voie.

CONTRÔLE CORTICAL DE LA MOTRICITÉ

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. Définir la notion de cortex moteur
2. Décrire l'organisation fonctionnelle du cortex moteur
3. Indiquer les efférences du cortex moteur
4. Décrire le rôle des voies pyramidales et extrapyramidales
5. Décrire le rôle de chaque aire motrice corticale
6. Décrire l'effet d'une lésion limitée à l'aire motrice primaire
7. Décrire l'effet d'une lésion limitée à la voie pyramidale

PLAN

INTRODUCTION

1. MISE EN ÉVIDENCE DES AIRES CORTICOMOTRICES

2. ASPECTS FONCTIONNELS DU CORTEX MOTEUR

3. LES VOIES MOTRICES CENTRALES

4. RÔLE DES DIFFÉRENTES AIRES CORTICALES MOTRICES

5. RÔLE DES AFFÉRENCES SENSORIELLES

6. EXPÉRIENCES DE LÉSION DU CORTEX MOTEUR PRIMAIRE ET DU FAISCEAU PYRAMIDAL

CONCLUSION

INTRODUCTION

La motricité regroupe l'ensemble des mécanismes qui permettent de maintenir les postures, d'assurer l'équilibre et de mouvoir le corps et les membres par rapport aux objets qui nous entourent. C'est une fonction importante du système nerveux grâce à laquelle l'organisme peut survivre en agissant sur son environnement.

La motricité cinétique peut s'effectuer selon un mode réflexe, automatique ou volontaire. Contrairement aux mouvements réflexes, les mouvements volontaires sont intentionnels améliorés par l'expérience et l'apprentissage. Ces mouvements ne requièrent pas nécessairement d'informations sensibles pour avoir lieu.

Le mouvement volontaire est particulièrement complexe comparé au mouvement réflexe puisqu'il nécessite d'abord d'identifier et de localiser une cible, ensuite d'organiser un plan d'action et pour finir d'exécuter un programme. Le plan et l'exécution sont élaborés au niveau cortical, donc à un niveau conscient. Ainsi, le faisceau corticospinal relie le cortex moteur aux motoneurones pour générer le mouvement.

1. MISE EN ÉVIDENCE DES AIRES CORTICOMOTRICES

Trois conditions sont nécessaires pour qu'une région du cortex cérébral soit considérée comme **cortico-motrice** :

- 1- sa stimulation électrique doit produire des mouvements stéréotypés ;
- 2- l'ablation de cette zone doit supprimer ces mouvements ou les perturber ;
- 3- la décharge des cellules qui sont situées à cet endroit du cortex doit être modifiée quelques fractions de seconde avant ou pendant l'exécution d'un mouvement volontaire mémorisé.

Plusieurs zones corticales répondent à ces conditions :

- **l'aire motrice primaire** (AMP) située dans la région frontale ascendante appelée aire 4 selon la classification cyto-architectonique de Brodmann.

- **L'aire motrice supplémentaire (AMS)** située sur la face interne du lobe frontal en avant de l'aire motrice principale.
- **L'aire prémotrice (APM)** située en avant de ces deux zones, dans la région frontale

Certaines zones, en particulier à la limite de la région interhémisphérique du **cortex pariétal**, présentent également ces caractéristiques, ainsi que la **zone postérieure du cortex pariétal** sur laquelle se font des projections cortico-corticales du cortex visuel. Des stimulations électriques de toutes ces zones pratiquées chez l'homme à l'occasion d'intervention de neurochirurgie entraînent l'apparition de mouvements stéréotypés.

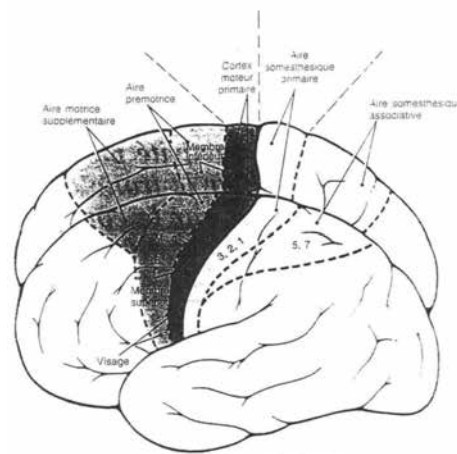


Fig.1.les aires fonctionnelles motrices et sensibles du cortex cérébral

2. ASPECTS FONCTIONNELS DU CORTEX MOTEUR

2.1 ORGANISATION SOMATOTOPIQUE

Une des caractéristiques fondamentales du cortex moteur est d'être organisé de manière topographique : c.a.d. qu'une partie précise de l'aire 4 commande les muscles d'une partie précise du corps.

Des expériences pratiquées d'abord chez l'animal, puis chez l'homme (en particulier par Penfield à Montréal dans les années 50) ont montré que la stimulation de l'aire 4 par de faibles courants entraîne des contractions musculaires dans l'hémicorps controlatéral.

Cette correspondance entre les parties de l'aire 4 et les différents groupes musculaires n'est pas proportionnelle : plus de la moitié du cortex moteur primaire correspond au contrôle des muscles de la main et de la parole. Ceci est dû à un développement phylogénétique considérable qui permet de distinguer l'homme des autres espèces animales par :

- La capacité exceptionnelle d'utiliser les mains, les doigts et le pouce dans l'exécution de tâches manuelles requérant une importante dextérité.
- L'utilisation de la bouche, des lèvres, de la langue et des muscles faciaux pour parler.

Cette organisation topographique ou somatotopique réalise une représentation déformée, croisée et disproportionnelle appelée homoncule moteur. Elle se superpose à l'organisation horizontale (laminaire) et à l'organisation verticale (en colonnes) du cortex moteur.

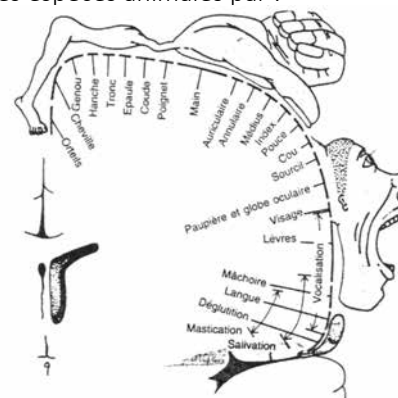


Fig.2. Organisation somatotopique du cortex moteur primaire

2.2 ORGANISATION EN COLONNES DU CORTEX MOTEUR

Les expériences de microstimulations qui ont permis de dresser la carte somatotopique montrent que toutes les cellules d'une même colonne corticale perpendiculaire à la surface du cortex sont impliquées au même moment. Le cortex moteur apparaît ainsi comme une succession de colonnes cellulaires de 300 à 400 microns de diamètre chez le primate. Ces colonnes sont parallèles entre elles et fonctionnellement disposées en damier. Le fonctionnement du cortex moteur ne diffère en ce point nullement du reste du cortex, en particulier sensoriel ou somesthésique. L'alternance de colonnes correspondant à des muscles extenseurs et fléchisseurs peut se rattacher par analogie à l'inhibition latérale que l'on observe dans le cortex somesthésique. Chaque colonne constitue ainsi une unité fonctionnelle chargée de contrôler un muscle ou un groupe de muscles synergiques.

2.3 ACTIVITÉ UNITAIRE DU CORTEX MOTEUR PENDANT LE MOUVEMENT

EVARTS a conditionné des singes à effectuer certains mouvements et a enregistré par des microélectrodes l'activité de cellules du cortex moteur pendant ces mouvements (enregistrement unitaire). Ces enregistrements ont montré que :

- les cellules pyramidales de l'aire 4 commencent à décharger 120 à 150 ms avant le début du mouvement.
- la fréquence de décharge des cellules de l'aire motrice principale est proportionnelle à la force développée par le muscle activé. Ces neurones codent ainsi l'importance de la force (neurones statiques) ; d'autres déchargent au début du mouvement puis s'arrêtent codant ainsi la variation de la force (neurones dynamiques).
- pour une même articulation on a remarqué qu'il y a des neurones de l'aire 4 qui augmentaient leur fréquence de décharge avant le début d'un mouvement de flexion, alors qu'ils la diminuaient avant une extension, et d'autre qui font l'inverse.
- l'activité de certains neurones variait avec la vitesse du mouvement.

2.4 LA BOUCLE TRASCORTICALE

Certains neurones du cortex moteur reçoivent des informations proprioceptives du muscle qu'ils contrôlent, tandis que d'autres reçoivent des informations des récepteurs cutanés localisés dans la peau déformée par la contraction du même muscle.

Ces connexions nerveuses longues pourraient être le support de réflexe « spino-cortico-spinaux » complétant le travail local du réflexe myotatique lorsque le mouvement à exécuter rencontre un obstacle inattendu.

Si le mouvement est gêné par une charge par exemple, la contraction des fibres intrafusoriales est plus importante que celle des fibres extrafusoriales et les fibres sensibles fusoriales seront ainsi activées. Cette information véhiculée par les fibres sensibles afférentes (Ia, II) arrive d'abord au cortex somesthésique et sera véhiculée par la suite au cortex moteur via des fibres d'association appelées fibres transcorticales.

Ainsi on constate 3 types de réponses électromyographiques lors de l'application soudaine de charges pendant l'exécution d'une tâche motrice.

- a- Une réponse de courte latence (15-20 ms) correspond au réflexe myotatique conséquence du brusque étirement du muscle.
- b- Une réponse de latence plus longue (45-20 ms) est attribuée à la mise en jeu de la boucle transcorticale.
- c- Une réponse plus tardive (70-75 ms) est en rapport avec le mouvement volontaire de correction.

3. LES VOIES MOTRICES CENTRALES

Les voies motrices centrales, efférences des aires motrices forment 2 groupes : la voie pyramidale, appelée ainsi parce que les fibres qui la composent occupent la pyramide bulbaire et les voies extrapyramidaux qui ne passent pas par la pyramide bulbaire.

3.1 LA VOIE PYRAMIDALE

Elle comporte deux contingents de fibres, l'un destiné aux noyaux moteurs des nerfs crâniens (faisceau CORTICO-NUCLEAIRE ou GENICULE) l'autre destiné aux motoneurones de la corne antérieure de la moelle (faisceau CORTICO-SPINAL).

Les fibres du faisceau pyramidal passent dans la capsule interne puis dans les pédoncules cérébraux et la protubérance. Les fibres cortico-nucléaires croisent la ligne médiane à différents niveaux du tronc cérébral pour se rendre aux noyaux moteurs des nerfs crâniens du côté opposé.

Les fibres cortico-spinales forment la pyramide bulbaire puis se divisent en deux faisceaux descendants.

- le faisceau **PYRAMIDAL CROISÉ** ou latéral croise la ligne médiane au niveau de la partie inférieure du bulbe et descend dans la moelle au niveau du cordon latéral. Il aboutit aux motoneurones de la corne antérieure de la moelle, en particulier ceux destinés aux muscles distaux des membres.
- le faisceau **PYRAMIDAL DIRECT** ou antérieur (@15 % des fibres) descend du même côté dans la moelle le long du sillon antérieur. Il aboutit aux motoneurones contrôlant les muscles du cou et du tronc. Les axones qui le forment ont une distribution bilatérale et ne croisent la ligne médiane que près de leur terminaison.

Les axones du faisceau pyramidal s'articulent avec les motoneurones alpha et gamma soit directement soit par l'intermédiaire d'interneurones (cas le plus fréquent).

3.2 LES VOIES EXTRAPYRAMIDALES

Ces voies partent essentiellement du cortex moteur. Elles passent par la capsule interne où elles sont mélangées avec les axones de la voie pyramidale.

Ces voies font obligatoirement relais au niveau du tronc cérébral à partir duquel elles forment plusieurs faisceaux descendants :

- rubro-spinal
- réticulo-spinaux
- faisceaux vestibulo-spinaux
- faisceau olivo-spinal part de l'olive bulbaire et ne dépasse pas la moelle cervicale
- faisceau tecto-spinal

Au niveau de la moelle épinière, la disposition anatomique des faisceaux permet de décrire un contingent latéral et un contingent ventro-médian qui se distinguent par un rôle fonctionnel différent.

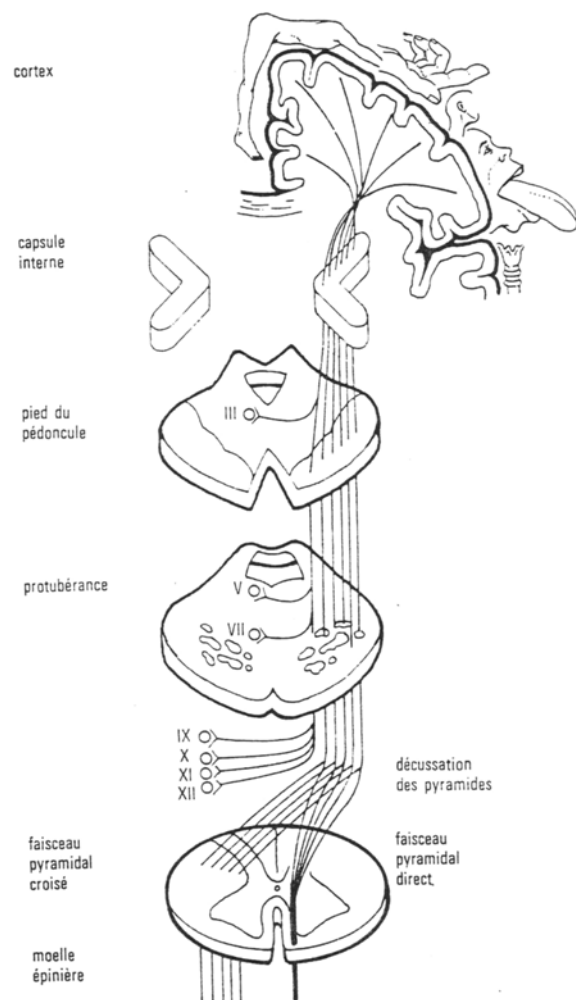
- Le contingent latéral contient les faisceaux réticulo et rubro-spinaux qui facilitent les activités de flexion des muscles des extrémités.

- Le contingent ventro-médian qui groupe les faisceaux : tecto-spinal, vestibulo-spinal, olivo-spinal et reticulo-spinal ventral (réticulé pontique). Leur action principale est de faciliter les motoneurones des muscles extenseurs.

Les projections des fibres réticulo-spinales sont :

- Bilatérales et concernant surtout les muscles axiaux et proximaux impliqués dans la statique antigravitaire et l'holocinèse. Les faisceaux vestibulo-spinaux, directement reliés aux structures sensorielles vestibulaires responsables du repérage de la position verticale, participent aux mécanismes de l'équilibration et aux corrections posturales qui l'accompagnent. Leur action est complémentaire de celle de l'orientation de la tête déclenchée à partir des informations visuelles et auditives qui projettent leur activité dans le colliculus mésencéphalique et s'expriment par les faisceaux tectospinaux.

Figure 3. La voie corticospinale ou pyramidale



4. RÔLE DES DIFFÉRENTES AIRES CORTICALES MOTRICES

4.1 LE CORTEX MOTEUR PRIMAIRE

Son seuil de stimulation est faible et entraîne une réponse musculaire de l'hémicorps controlatéral selon une somatotopie bien précise.

Le cortex moteur primaire est le centre de **commande** et de **l'exécution** du mouvement. Il commande la motricité de l'hémicorps opposé. Il participe également à la **programmation** du mouvement en codant le groupe de muscles à activer, la direction, la force et la vitesse du mouvement.

4.2 L'AIRES CORTICALE PRÉMOTRICE

Le seuil de stimulation est plus élevé que celui du cortex moteur primaire et sa somatotopie est moins précise. La stimulation de cette aire donne soit des contractions musculaires simples soit des mouvements plus complexes (rotation de la tête, émission de sons...) ayant des délais d'apparition plus longs et dus à la mise en jeu successive de plusieurs groupes musculaires (flexion extension alternés par exemple...).

Cette aire participe à la préparation du mouvement grâce à ses connexions avec le **cervelet** et avec les **NGB**. La lésion de cette aire perturbe la réalisation des mouvements surtout les mouvements rapides et visuo-guidés.

4.3 AIRE MOTRICE SUPPLÉMENTAIRE

L'enregistrement unitaire de cellules de l'AMS montre que celles-ci déchargent avant le début du mouvement. Les études du débit sanguin cérébral ont montré que l'exécution d'un mouvement des doigts s'accompagnait d'une activation de l'AMS et de l'aire motrice primaire contralatérale au mouvement. Mais quand on demande au sujet de penser seulement au geste des doigts sans le réaliser, seule l'AMS est alors activée. C'est donc l'**intention** du mouvement qui a provoqué l'activation de l'AMS.

Ces constatations permettent de déduire que l'AMS est impliquée aussi bien dans la phase d'**exécution** et de **préparation** du mouvement surtout les mouvements complexes et motivés par des stimuli internes. Elle interviendrait du point de vue hiérarchique avant l'aire 4 à la phase d'**intention** de mouvement.

Elle participe à la coordination motrice entre les deux cortex droit et gauche et contrôle l'enchaînement des actes moteurs nécessitant la mise en jeu des deux mains (mouvements bimanuels). Quand l'AMS est lésée, la coordination entre les deux membres supérieurs devient impossible pour réaliser une tâche bimanuelle.

4.4 CORTEX ASSOCIATIF PARIÉTAL (AIRES 5 ET 7)

Mountcastle a mis en évidence au niveau de cette zone du cortex la présence de neurones activés quelques millisecondes avant un acte moteur de projection vers une cible ou de manipulation. Ces neurones ne se mettent en activité que si l'acte moteur correspond à un comportement motivé (mouvement dirigé vers la nourriture pour un animal qui a faim). Cette région du cortex semble être impliquée dans la **préparation** de mouvement dirigé vers un stimulus ayant une signification **motivationale**.

5. RÔLE DES AFFÉRENCES SENSORIELLES

Les afférences proprioceptives et visuelles sont les plus importantes.

Les singes ayant un membre dés afférenté (privé de toute innervation sensitive) cessent d'utiliser ce membre. Ils peuvent cependant réapprendre l'usage de ce membre en utilisant le contrôle visuel.

Les informations proprioceptives sont importantes pour le contrôle du mouvement (correction des perturbations au cours de l'exécution, préparation du mouvement...).

La pariétale ascendante participe au faisceau corticospinal et à l'activité motrice

Le rôle exact de cette région dans l'activité motrice reste problématique, mais il est acquis qu'un tiers du faisceau corticospinal est efférent de cette région. Comme la région pariétale ascendante reçoit de façon privilégiée les informations somesthésiques en provenance du thalamus, cette région a longtemps été considérée comme exclusivement sensitive. C'est pourquoi elle avait reçu antérieurement le nom d'aire somesthésique primaire. En fait, la stimulation de cette aire avec une intensité bien supérieure à celle nécessaire pour stimuler les neurones de l'aire motrice principale provoque des contractions musculaires (mouvements en rampe). Une organisation somatotopique grossière peut être retrouvée. La destruction de cette aire entraîne un déficit dans les mouvements fins de la partie distale des membres. Enfin, on a pu mettre en évidence que les cellules corticales de l'aire pariétale ascendante présentaient des décharges avant le début des mouvements lents. Sur le plan du fonctionnement, il semble donc que la différence entre les aires corticales dites motrices et les aires corticales dites sensibles ne soit pas aussi évidente qu'on le pense ordinairement. C'est pourquoi, pour désigner l'ensemble des aires corticomotrices, on tend à utiliser la dénomination d'« **aires sensori-motrices** ». **Le lobe pariétal postérieur fournit une aide visuelle au mouvement.**

6. EXPÉRIENCES DE LÉSION DU CORTEX MOTEUR PRIMAIRE ET DU FAISCEAU PYRAMIDAL

Les lésions strictement limitées au cortex moteur sont exceptionnelles chez l'homme. En effet, les lésions cérébrales, qu'ils s'agissent de lésions vasculaires ou tumorales touchent aussi le cortex situé en avant (cortex prémoteur) ou en arrière (somesthésiques), ainsi que la substance blanche sous-corticale et éventuellement les NGC.

En revanche, il est possible chez l'animal expérimental de créer des lésions sélectives du cortex moteur et même des lésions de certaines zones limitées au cortex moteur.

6.1 LÉSION DE L'AIRE MOTRICE PRIMAIRE (AIRE 4).

Elle entraîne des troubles moteurs contralatéraux :

- une paralysie transitoire des muscles (hémiplégie) ; le déficit est d'autant plus important que la lésion est large.
- une diminution du tonus musculaire.
- une inversion du réflexe cutané-plantaire (signe de Babinski) : la stimulation du bord externe du pied par un stimulus appuyé entraîne une extension dorsale des orteils (et non pas une flexion plantaire comme chez le sujet normal).

L'hémiplégie régresse peu à peu. Les muscles des racines des membres récupèrent avant ceux des extrémités et il ne persiste qu'un léger déficit musculaire prédominant sur les muscles des extrémités (hémiparésie) rendant les mouvements des extrémités maladroits et imprécis. L'hypotonie légère et le signe de Babinski persistent.

Les tâches motrices apprises avant la lésion peuvent encore être accomplies et l'apprentissage de nouvelles tâches reste possible.

6.2 SECTION DU FAISCEAU PYRAMIDAL

La lésion d'une aire corticale ne détruit pas uniquement les cellules d'origine des voies pyramidales, mais aussi celles de fibres extrapyramidales. La section chez le singe d'une pyramide bulbaire permet d'étudier les fonctions du faisceau pyramidal. Cette section entraîne :

- une parésie des muscles des extrémités des membres, avec impossibilité d'effectuer des mouvements précis
- une diminution du tonus musculaire (hypotonie)
- un signe de Babinski.

De ces observations on peut dire que :

- la voie pyramidale exerce un effet facilitateur permanent sur les muscles (donc tend à accroître le tonus musculaire). Elle contrôle la motricité fine et précise assurée par les muscles de la main, du pied et de la face.

Les voies extrapyramidales transmettent des signes inhibiteurs du cortex (tendent à diminuer le tonus musculaire). Ces voies assurent le contrôle de la motricité posturale (nuque, dos...) qui sert de support aux mouvements intentionnels fins.

CONCLUSION

Les activités motrices volontaires résultent d'une série d'étapes mettant en jeu différentes structures nerveuses hiérarchisées dont l'action est coordonnée en vue de réaliser ces différentes tâches avec le maximum d'efficacité et de précision et le minimum d'énergie. Le cortex moteur, point de départ de la commande d'exécution du mouvement est assisté par d'autres structures qui contrôlent son activité. Les aires pariétales postérieures, intégrant les informations sensorielles de plusieurs sources (somesthésiques, visuelles et auditives) permettent une situation environnementale et, éventuellement une cible pouvant être le but à atteindre par un mouvement. Ces informations sont transmises au cortex frontal. À ce niveau-là, un comportement est conçu avec les NG de la base.

Sa composante motrice somatique est transmise aux aires prémotrices et supplémentaires.

Celles-ci établissent le programme moteur nécessaire (muscle, force musculaire, durée des contractions, coordination...) avant de le transmettre aux noyaux moteurs via l'aire motrice primaire.

Pendant l'exécution même du mouvement, un contrôle notamment aux informations spino-corticales somesthésiques et surtout aux informations spino-cérébello-thalamo corticales.

LA SOMESTHÉSIE

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. Citer les principaux types de récepteurs somatiques.
2. Indiquer le stimulus spécifique pour chacun d'entre eux.
3. Rappeler la relation qui existe entre l'intensité du stimulus et la fréquence de décharge des fibres afférentes.
4. Définir un dermatome.
5. Expliquer l'intérêt de l'étude des dermatomes.
6. Décrire le trajet de l'information sensitive envoyée par le système extra-lemniscal à partir des récepteurs jusqu'au cortex cérébral.
7. Expliquer l'organisation somatotopique du système lemniscal.
8. Décrire le trajet du système extra-lemniscal dans:
 - La moelle
 - Le tronc cérébral
 - Le cortex
9. Dédire les différents types de perte de sensibilité à partir d'observations anatomo-cliniques rencontrées chez l'homme.

PLAN

1. DÉFINITION
 2. CLASSIFICATION DES SENSATIONS SOMATIQUES
 3. TRADUCTION DES STIMULATIONS SENSITIVES
EN INFLUX NERVEUX ET NOTION DE POTENTIEL EVOQUE
 4. LE CHAMP RÉCEPTEUR
 5. NOTION DE DERMATOME
 6. LES VOIES ET LES CENTRES IMPLIQUÉS DANS
L'INTÉGRATION DES MESSAGES SOMESTHÉSQUES
 7. CODAGE CENTRAL DES MESSAGES SOMESTHÉSQUES
 8. NOTION DE SOMATOTOPIE
- CONCLUSION

1. DÉFINITION

La somesthésie est une sensibilité consciente, complexe : tactile (pression, vibrations...), thermique, douloureuse (nociceptive) et proprioceptive consciente (kinesthésie).

2. CLASSIFICATION DES SENSATIONS SOMATIQUES

- Sensations extéroceptives : cutanées.
- Sensations proprioceptives : articulaires, sens du mouvement et kinesthésie.
- Sensations profondes : des organes, tissus profonds, des os...

Le point de départ de la sensation somatique est le récepteur qui véhicule l'information via des voies somesthésiques vers le cortex somesthésique (sensibilité consciente).

3. PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES RÉCEPTEURS

3.1 DÉFINITION D'UN RÉCEPTEUR

Les récepteurs sont des structures spécialisées annexées aux fibres nerveuses sensibles. Ils sont situés à l'extrémité distale des neurones afférents primaires (protoneurones sensitifs ou cellule bipolaire).

Le récepteur sensoriel transforme les stimulations : mécanique, thermique, chimique, lumineuse... en influx nerveux au niveau de la fibre afférente.

Les récepteurs sont sensibles à la forme d'énergie pour laquelle ils sont morphologiquement et fonctionnellement différenciés. Cette stimulation donnera alors naissance à une sensation spécifique.

3.2 POTENTIEL GÉNÉRATEUR OU POTENTIEL RÉCEPTEUR

Les récepteurs, quelle que soit leur morphologie, jouent le rôle de transducteur : ils transforment une stimulation mécanique, thermique ou chimique en un message nerveux afférent. Le stimulus adéquat provoque une augmentation de la perméabilité de la membrane des terminaisons sensibles aux ions Na^+ , ceci entraîne une dépolarisation partielle des terminaisons. La valeur de cette dépolarisation est fonction de l'intensité du stimulus. Cette dépolarisation traduit un potentiel local appelé potentiel de récepteur. Quand le potentiel récepteur atteint un certain seuil, il y a naissance d'un PA au niveau de la fibre afférente.

L'augmentation de l'intensité de la stimulation se traduit par une augmentation de la fréquence des PA au niveau de la fibre afférente : c'est le codage en fréquence.

3.3 ADAPTATION DES RÉCEPTEURS

C'est la diminution de la réponse d'un récepteur lors d'une stimulation continue. Dans ce cas le potentiel générateur atteint son amplitude maximale lors de l'établissement du stimulus, amplitude qui diminue de façon exponentielle : c'est le phénomène d'adaptation.

Au niveau des récepteurs à adaptation lente, l'amplitude du potentiel générateur varie très peu durant la stimulation.

3.4 CHAMP RÉCEPTEUR

Le champ récepteur représente la surface cutanée innervée par une cellule sensitive bipolaire. La taille de ce champ récepteur est inversement proportionnelle à la densité des récepteurs. La surface cutanée dans laquelle le sujet ne sent qu'un stimulus détermine la taille du champ récepteur. Il est très petit au niveau de l'extrémité des doigts, alors qu'il est plus large au niveau de la peau du dos.

3.5 NOTION DE CAPACITÉ DISCRIMINATIVE

Cette capacité peut être explorée en clinique par l'épreuve du compas de Weber. On pique la peau du sujet avec les pointes d'un compas dont l'écartement des branches est modifié jusqu'à ce que celui-ci ressente deux piqûres. La perception de deux sensations distinctes traduit la mise en jeu de deux champs récepteurs différents.

Ce pouvoir ou capacité discriminative est inversement proportionnel à la densité des récepteurs. Ainsi, plus la densité est grande, plus la distance séparant deux stimulations distinctes est petite et plus le pouvoir discriminatif est grand.

4. DIFFÉRENTS TYPES DE RÉCEPTEUR

4.1 RÉCEPTEURS CUTANÉS

Au niveau de la peau, on peut détecter au moins trois sensations :

- Mécaniques : sens tactile et kinesthésique, sens du mouvement et des articulations.
- Thermiques : sensation de la chaleur et du froid
- Algiques : douleur

* LES MÉCANORÉCEPTEURS

- **Les mécanorécepteurs de bas seuil** : ils détectent des stimulations mécaniques de faible intensité. Ils sont annexés à des afférences de type A β (fibres myélinisées à vitesse de conduction élevée : 70 à 80 m/sec).

Parmi ces récepteurs, on trouve :

- *Des récepteurs à adaptation lente*

Exp. : Les disques de Merkel dont le potentiel de récepteur va se maintenir tout le long de la stimulation. Ce récepteur ne s'adapte pas à la stimulation et va coder donc la durée du stimulus.

• Des récepteurs à adaptation rapide

Exp. : Corpuscules de Pacini qui sont sensibles aux stimulations sinusoïdales réalisées par le diapason. Ces récepteurs sont responsables de la sensibilité vibratoire (seuil 250C/sec) la réponse est très fidèle.

• Des récepteurs à effet « on » et effet « off »

Exp. : corpuscules de Meissner responsable de la sensibilité vibratoire (30c/sec) ils ne détectent que le début (on) et la fin de la stimulation (off).

- Les mécano-récepteurs de haut seuil

Ce sont des récepteurs qui détectent les sensations douloureuses.

Ce sont des terminaisons libres (fibres de type IV ou amyéliniques de type C).

*LES THERMORÉCEPTEURS

* **Au chaud** : ce sont des terminaisons libres annexées à des fibres amyéliniques C. Ils sont inactifs quand la température de la peau est inférieure à 30 °C. Ces récepteurs au chaud sont aussi bien sensibles à la vitesse d'augmentation de la température (réponse dynamique) qu'au niveau thermique atteint (réponse statique). Cette réponse statique est maximale pour une température cutanée voisine de 45 °C.

* **Au froid** : Ce sont des terminaisons libres annexées à des fibres amyéliniques C

Exp. : Corpuscules de Krause.

Ces récepteurs ont une activité dynamique et statique. L'activité statique débute au-dessous de 30 °C, elle est maximale à 20 °C et cesse pratiquement au-dessous de 10 °C. Les récepteurs au froid sont silencieux lorsque la peau est à une température à 30 °C, redeviennent actifs lorsque la température cutanée est supérieure à 45 °C, cette réponse paradoxale est probablement responsable du frissonnement que l'on éprouve en pénétrant dans un bain très chaud.

*LES NOCICEPTEURS

Ont des seuils de stimulation très élevés : ils ne répondent que lorsque les stimulations menacent l'intégrité de la peau. il y a 3 types de nocicepteurs :

- Mécano-nocicepteurs
- Thermo-nocicepteurs
- Nocicepteurs polymodaux

4.2 LES PROPRIOCEPTEURS

- * Récepteurs musculaires
- * Récepteurs tendineux de Golgi
- * Récepteurs articulaires

4.3 LES RÉCEPTEURS VISCÉRAUX OU INTÉROCEPTEURS*

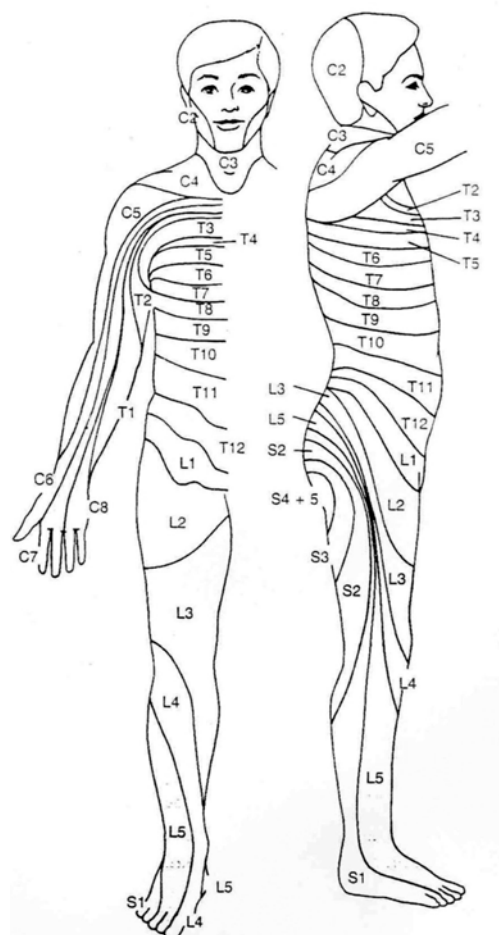
Ils réagissent au stimulus produit dans le milieu interne, c'est-à-dire les viscères et les vaisseaux. Exemple de stimulus : les changements chimiques, l'étirement des tissus et la température.

5. NOTION DE DERMATOME

C'est un territoire cutané innervé par des fibres sensitives issues d'une seule racine rachidienne postérieure.

La cartographie des dermatomes a été établie par Sherrington grâce à des sections étagées : section par rapport à une racine rachidienne intacte de deux ou trois racines postérieures au-dessus et en dessous. L'exploration au niveau de la peau du territoire dont la sensibilité est restée intacte permet de délimiter le dermatome correspondant. Grâce à cette étude, une cartographie des dermatomes a pu être établie.

Fig.1. Les dermatomes
(modifié d'après Grinker et Sahs)



6. LES VOIES SOMESTHÉSIQUES

Les voies somesthésiques se projettent sur le cortex somesthésique controlatéral (cortex pariétal).

6.1 VOIE LEMNISCALE

A. TRAJET ANATOMIQUE

Le 1^{er} neurone : issu du récepteur, gagne la moelle épinière et monte par le cordon postérieur jusqu'au bulbe rachidien où il fait synapse dans les noyaux de Goll et de Burdach. L'ensemble de ces neurones constitue le faisceau de Goll et de Burdach.

Le 2^e neurone : dont le corps cellulaire est situé dans les noyaux de Goll et de Burdach, monte dans le lemnie médian du tronc cérébral, croise le plan de symétrie et se termine dans le noyau ventro-postérieur du thalamus controlatéral. L'ensemble de ces neurones constitue le faisceau lemniscal.

Le 3^e neurone : appelé neurone thalamo-cortical. La projection des neurones thalamo-corticaux se fait principalement sur l'aire somesthésique primaire (S1). Un faible contingent se projette sur l'aire somesthésique secondaire (SII).

B. CARACTÉRISTIQUES FONCTIONNELLES DE LA VOIE LEMNISCALE

- véhicule la sensibilité tactile fine (sensibilité épicritique) et kinesthésique.
- vitesse de conduction élevée : Les fibres de gros diamètres et myélinisées. La voie néo-spino-thalamique est moins rapide (fibres primaires du groupe Aβ et C).
- Fidélité de la transmission nerveuse :
Elle a lieu grâce à :
 - des champs récepteurs petits ce qui explique que les messages transmis par cette voie donnent des sensations beaucoup plus précises spatialement que les messages véhiculés par la voie néo-spino-thalamique.
 - au phénomène d'inhibition latérale : l'excitation d'un récepteur sensoriel de la peau se traduit non seulement par des signaux excitateurs au cortex somesthésique, mais également par des signaux inhibiteurs latéraux transmis aux fibres adjacentes. Ces signaux inhibiteurs apparaissent à chaque relais synaptique et aident à bloquer la propagation latérale du signal exciteur.
- somatotopie précise

La somatotopie traduit la projection de chaque région du corps au niveau d'une zone bien précise de la structure nerveuse. La somatotopie est respectée au niveau des voies et des relais. Au niveau de l'aire somesthésique primaire, on trouve une somatotopie précise avec une représentation très précise de l'hémicorps opposé. Plus la densité des récepteurs est élevée, plus la représentation somatotopique est large. Ainsi, la main occupe une large surface sur le cortex somesthésique.

Cette somatotopie reflète la fidélité de la transmission synaptique en allant de la périphérie jusqu'au cortex somesthésique.

6.2 VOIES EXTRA LEMNISCALES

A. TRAJET ANATOMIQUE

Elle est constituée de trois contingents de fibres :

Contingent néo-spino-thalamique (NST)

- * Le 1^{er} neurone : issu du récepteur, fait synapse dans la corne postérieure de la moelle épinière.
- * Le 2^e neurone croise, dans la moelle épinière le plan de symétrie et monte par le cordon antérolatéral jusqu'au thalamus où il se termine dans le noyau ventro-postérieur.
- * Le 3^e neurone est thalamo-cortical : ces neurones de 3^e ordre se terminent pour une part dans l'aire somesthésique I, mais surtout dans l'aire somesthésique II.

Contingent paléo-spino-thalamique (PST)

C'est un système phylogénétiquement ancien :

- * Le 1^{er} neurone issu des récepteurs, fait synapse dans la corne postérieure de la M.E.
- * Le 2^e neurone croise dans la moelle le plan de symétrie et monte dans le cordon antérolatéral pour se terminer au niveau de la formation réticulée thalamique.
- * L'ensemble des neurones de 3^e ordre se projette de façon diffuse sur le cortex cérébral.

Contingent spino-réticulaire

C'est également un système phylogénétiquement ancien :

- * Le 1^{er} neurone issu du récepteur fait synapse dans la corne postérieure de la M.E.
- * Le 2^e neurone croise, dans la M.E. le plan de symétrie, et se termine dans la formation réticulée mésencéphalique.

Le système spino-réticulaire et paléo-spino-thalamique véhiculent des messages qui sont à l'origine de sensations diffuses, difficilement localisables spatialement et presque essentiellement de sensations douloureuses (sensibilité protopathique).

Il faut ajouter à ces voies de la sensibilité générale du corps les voies somesthésiques crâniennes qui permettent la sensibilité de la face, de la langue, des dents....

B- CARACTÉRISTIQUES FONCTIONNELLES

C'est une voie qui se caractérise par :

- La transmission de la sensibilité tactile grossière (protopathique), thermique et douloureuse.
- Sa conduction lente : plusieurs relais synaptiques, fibres de petit diamètre.
- L'absence de fidélité de transmission : pas de phénomène d'inhibition latérale, champ récepteur large, voie diffuse...
- Une Somatotopie floue

L'ÉLECTROENCÉPHALGRAMME

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. Décrire les activités électro-encéphalographiques physiologiques chez l'adulte à l'état de veille et de sommeil.
2. Préciser l'intérêt de l'électro-encéphalogramme.

PLAN

1. INTRODUCTION
2. ÉLECTROGENÈSE CÉRÉBRALE
3. EEG DE L'ADULTE NORMAL
4. VARIATIONS PHYSIOLOGIQUES
5. EEG EN PATHOLOGIE

1. INTRODUCTION

L'électroencéphalogramme (EEG) est l'enregistrement de l'activité électrique du cerveau au niveau du scalp. L'activité électrique cérébrale fut mise en évidence en 1875 par Caton chez l'animal, mais les premières études chez l'homme sont l'œuvre de Berger en 1929. Depuis, les méthodes d'enregistrement se sont améliorées et l'EEG est devenu un examen de pratique courante.

2. ÉLECTROGENÈSE CÉRÉBRALE

2.1 FONCTIONNEMENT DU NEURONE

L'influx arrive au corps cellulaire ou soma par les dendrites et par l'axone qu'il parcourt jusqu'à sa terminaison. Là il fait relais avec une autre cellule au niveau d'une synapse. On peut considérer le neurone comme un système à deux pôles, un pôle récepteur somato-dendritique et un pôle effecteur axonique. La membrane cellulaire est polarisée : au repos, les charges négatives sont intracellulaires et les charges positives extracellulaires. L'arrivée d'un influx entraîne une dépolarisation. Si celle-ci est importante, elle donne naissance au potentiel d'action. L'influx afférent atteignant la terminaison présynaptique, entraîne par l'intermédiaire d'un transmetteur chimique une modification de la polarisation de la membrane post-synaptique : le potentiel post-synaptique. Celui-ci peut être excitateur (PPSE) ou inhibiteur (PPSI).

2.2 NOTION DE GÉNÉRATEURS CORTICAUX

Un fragment de cortex isolé est le siège d'une activité spontanée pouvant être enregistrée par les électrodes transcorticales (c'est l'électro-corticographie).

On admet que le cortex comporte plusieurs générateurs. Les ondes corticales sont le reflet des variations du potentiel post-synaptique. Mais pour pouvoir donner lieu à un phénomène électrique enregistrable à distance (EEG), il faut admettre qu'un grand nombre de neurones présentent de façon simultanée les mêmes variations. C'est le phénomène de synchronisation des cellules corticales qui est probablement sous la dépendance des structures sous-corticales.

Au niveau du cortex, les cellules pyramidales ont une orientation perpendiculaire à la surface du cortex. Cette orientation permet la sommation des potentiels post-synaptiques (PPS). Les interneurons ont, par contre, une orientation très complexe ne permettant pas la sommation des PPS.

3. EEG DE L'ADULTE NORMAL

3.1 ENREGISTREMENT

Il s'agit donc d'enregistrer l'activité électrique spontanée du cerveau à partir d'électrodes posées sur le scalp. Le cuir chevelu au point de contact des électrodes est frotté pour diminuer sa résistance, puis enduit d'une pâte conductrice. Les électrodes sont maintenues en place par des lanières souples formant un casque. Leur disposition doit être toujours la même pour le même laboratoire, symétrique et équidistante. Sur le plan international, un modèle de placement a été proposé : c'est le système 10-20. Chaque électrode est reliée par un fil à l'appareil amplificateur enregistreur. Des filtres suppriment les basses et les grandes fréquences permettant d'éliminer les parasites.

On distingue deux types d'enregistrement :

- monopolaire ou référentiel donnant les différences de potentiel entre une électrode active et une électrode inactive ou supposée comme telle (menton, oreille, mastoïdes...).
- bipolaire enregistrant les différences de potentiel entre deux électrodes actives.

On recueille l'activité du sujet au repos, au cours de l'hyperpnée et lors de la stimulation lumineuse intermittente (SLI).

Les ondes EEG sont caractérisées par leur fréquence, leur amplitude, leur topographie et par les conditions de leur enregistrement.

On peut ainsi distinguer différents rythmes EEG.

3.2- RYTHMES CHEZ L'ADULTE

A- RYTHME ALPHA

Consiste en la succession d'ondes sinusoïdales dont la fréquence est de 8 à 13 Hz et dont l'amplitude est de 20 à 50 microvolts. Cette dernière est rarement constante, mais varie périodiquement pour dessiner soit des bouffées intermittentes soit plus souvent des fuseaux.

Le rythme alpha se distribue à une grande partie de l'hémisphère à l'exclusion de son pôle frontal ; son siège de prédilection est occipital. Il est recueilli lorsque le sujet est au repos, les yeux fermés, à l'abri des stimulations sensorielles, à l'état de détente, mais non endormi.

Il est bloqué par l'ouverture des yeux et est remplacé par une activité rapide de faible amplitude : c'est la réaction d'arrêt visuelle. Quelques instants après la fermeture des yeux, le rythme alpha réapparaît. La réaction d'arrêt peut être induite par des stimulations somato-sensorielles ou par l'activité intellectuelle, même si les yeux sont fermés.

On a pris l'habitude de distinguer 2 types de tracés :

- synchronisé constitué par le rythme alpha
- désynchronisé qu'on observe pendant la réaction d'arrêt.

B- RYTHME BÊTA

Il est caractérisé par des ondes très peu amples (5 à 10 microV) dont la fréquence est de 14 à 30 Hz. Son siège est frontal. Il est enregistré pendant l'état de veille. Il est bloqué par l'exécution d'un mouvement volontaire tel que la fermeture du poing.

C- RYTHME THÊTA

Il est fait d'ondes de fréquence 4 à 7 Hz et d'amplitude supérieure à 50 microV. Il est peu répandu sur le scalp. Il s'observe surtout au cours du sommeil.

D- RYTHME DELTA

Il est fait d'ondes lentes de fréquence inférieure à 4 Hz et de grande amplitude pouvant atteindre 100 microvolts.

Dans les conditions normales et chez l'adulte, ces ondes ne s'observent que pendant le sommeil.

On remarquera qu'il existe un rapport inverse entre fréquence et amplitude : plus un rythme est rapide, plus son amplitude est faible.

4. VARIATIONS PHYSIOLOGIQUES

4.1 TRACE DE SOMMEIL DE L'ADULTE

L'enregistrement de sommeil doit être polygraphique. On distingue deux types de sommeil

A- LE SOMMEIL À ONDES LENTES.

Qui comprend 4 stades :

- **Stade I** : se caractérise par une fragmentation du rythme alpha, puis sa disparition au profit d'une activité thêta.

- **Stade II** : l'activité est essentiellement thêta. On voit apparaître des fuseaux de sommeil, des complexes K et des pointes vertex.
- **Stade III** : l'activité de fond se ralentit encore pour devenir du delta.
- **Stade IV** : uniquement constitué par une activité delta ample.

B- LE SOMMEIL PARADOXAL

Il se caractérise par une activité EEG rapide proche de l'activité de veille, l'apparition de mouvements oculaires rapides et une abolition du tonus musculaire.

Au cours d'une nuit de sommeil, on observe 5 à 6 cycles de 90 mn environ comportant les 4 stades de sommeil à ondes lentes et une phase de sommeil paradoxal, les phases de sommeil paradoxal devenant de plus en plus longues au cours de la nuit et représentent en moyenne 20% de la durée totale du sommeil.

4.2 MATURATION DE L'EEG

Chez le nouveau-né, on distingue 3 états :

- L'état de veille avec un tracé lent et peu ample ;
- Le sommeil agité ;
- Le sommeil calme ;

Avec l'âge, le tracé s'organise, le rythme alpha apparaît et à 3 ans, l'activité cérébrale est peu différente de celle de l'adulte.

5- EEG EN PATHOLOGIQUE

5.1 PRINCIPALES ANOMALIES DE L'EEG

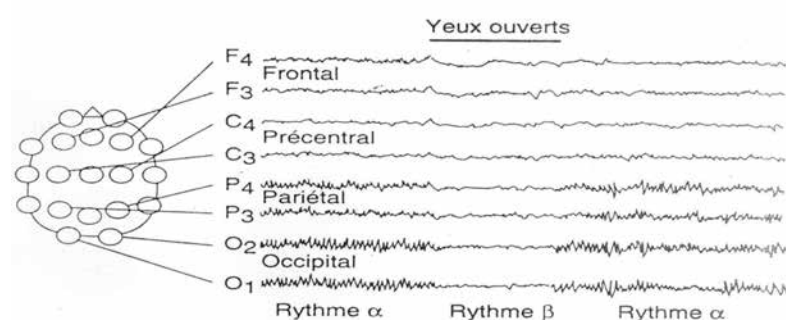
Sans entrer dans les détails, l'EEG peut être anormal :

- soit parce qu'il comporte des figures paroxystiques à type de pointes ondes ou de polypointes-ondes.
- soit parce qu'il comporte des ondes qui n'existent pas normalement, compte tenu de l'âge et de l'état de conscience : ondes delta.

5.2 INTÉRÊT DE L'EEG

L'EEG est important à considérer dans plusieurs affections, mais il faut l'interpréter toujours en fonction des données cliniques et l'âge du sujet. Ses principales indications sont l'épilepsie, les comas, les traumatismes crâniens, etc.

Figure.1. tracé de l'EEG chez l'adulte.



POTENTIELS ÉVOQUÉS

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. Définir les potentiels évoqués et préciser leurs techniques et l'intérêt de leurs principales utilisations.

PLAN

1. DÉFINITIONS
2. MÉTHODES
3. PRINCIPAUX POTENTIELS ÉVOQUÉS

1. DÉFINITIONS

On appelle potentiel évoqué (PE) une série de variations de potentiels électriques :

- Évoquée par la stimulation d'un système sensoriel faisant décharger de façon synchrone une large population de fibres afférentes.
- Transmise à travers les voies nerveuses et enregistrables à la surface du système nerveux central ou de tissus voisins.
- Faite de plusieurs composantes ayant chacune une latence, une polarité et une forme caractéristique lorsque l'enregistrement est réalisé en un point donné pour un stimulus standardisé.

Le PE est enregistré le plus souvent au niveau céphalique. Il peut provenir de dipôles rapprochés ou éloignés.

Chez l'homme, les PE sont obtenus de façon courante en réponse à des stimulations visuelles (PEV), auditives (PEA) et somesthésiques (PES). Les composantes précoces des PEA et des PES proviennent de champs lointains, les composantes tardives de champs proches. Les PE moteurs sont enregistrés au niveau des muscles, des membres après stimulation corticale et médullaire.

Aux PE proprement dits qui sont liés dans le temps à une stimulation, on rattache les potentiels liés à des événements ou potentiels événementiels. Leur apparition est liée soit à la préparation ou à la mise en jeu de programmes moteurs, soit au développement d'activités perceptives ou associatives. On les qualifie de potentiels cognitifs ou endogènes puisqu'ils peuvent apparaître en l'absence de stimulus externe.

2. MÉTHODES

2.1 ÉLECTRODES

Leur impédance doit être inférieure à 3000 ohms. On utilise des électrodes de surface ou des électrodes aiguilles sous-cutanées.

2.2 DÉRIVATIONS

L'enregistrement se fait en montage bipolaire ou monopolaire. Dans ce dernier cas, l'électrode active ou exploratrice est reliée à l'entrée G1 de l'appareil et la référence à l'entrée G2. La référence peut être céphalique ou extracéphalique.

2.3 NOMENCLATURE

En électrophysiologie, l'enregistrement étant extracellulaire, toute onde dirigée vers le haut est, par convention, dite négative. Elle est positive dans le cas contraire.

Les ondes des PE sont le plus souvent désignées par leur polarité (N pour négatif et P pour positif) suivie du chiffre de la latence de l'onde considérée (en millisecondes).

En pathologie, on fait référence au chiffre de la latence moyenne normale. On parle par exemple d'une onde P100 même si la latence mesurée est allongée. Dans ce cas, on dit par exemple que « l'onde P100 est à 120 ms ».

Ce poly a été téléchargé depuis <http://med-tmss.blogspot.com/2016/08/cours.html>

3. PRINCIPAUX POTENTIELS ÉVOQUES

3.1 POTENTIEL EVOQUE VISUEL (PEV)

Avant, on pratiquait la stimulation au flash. Actuellement, on utilise surtout la stimulation par damier inverse à l'aide d'un écran de télévision.

Le sujet est placé à 1 mètre de l'écran, on teste les yeux un à un, parfois les deux à la fois. L'enregistrement se fait sur la région occipitale. La réponse triphasique est représentée essentiellement par une onde positive, l'onde P100, précédée et suivie par deux ondes négatives plus petites et inconstantes.

Cet examen permet d'explorer les voies visuelles de la rétine ou cortex occipital. Ce sont les lésions démyélinisantes du nerf optique qui donnent les anomalies les plus significatives avec allongement important de la latence de l'onde P100 sans modification notable de son amplitude.

3.2 POTENTIEL EVOQUE AUDITIF (PEA)

La stimulation se fait par un clic par l'intermédiaire d'un écouteur. L'enregistrement est habituellement bipolaire, une électrode étant placée au niveau du vertex et l'autre au niveau de la mastoïde ou du lobe de l'oreille.

La réponse normale est faite de 7 ondes dans les 10 premières secondes dont les 5 premières sont les plus stables et les mieux exploitées en clinique. Ces ondes désignées par des chiffres romains, sont générées par le nerf auditif et les voies auditives du tronc cérébral.

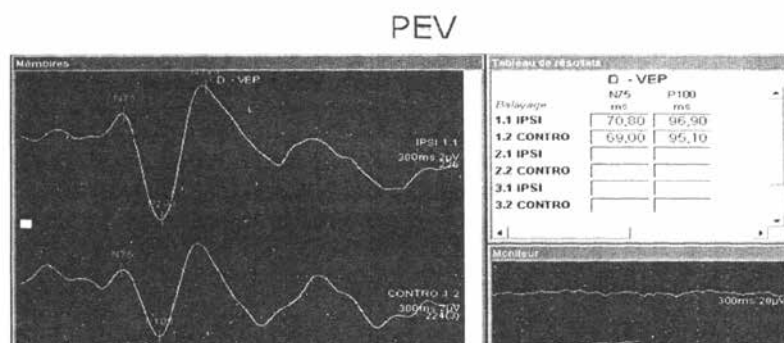
3.3 POTENTIEL EVOQUE SOMESTHESIQUE (PES)

Les nerfs le plus souvent stimulés sont le médian et le tibial postérieur. Pour le premier, l'enregistrement se fait au niveau de la région pariétale controlatérale et pour le 2e au niveau du vertex sur la ligne médiane. On explore ainsi les voies somesthésiques dans toute leur longueur.

3.4 POTENTIEL EVOQUE MOTEUR

Il s'agit d'une technique d'introduction plus récente (1980). La stimulation se fait au niveau du cortex, puis au niveau de la moelle épinière et le recueil au niveau d'un muscle des membres. On peut ainsi avoir le temps de conduction centrale qui est allongé en cas de lésion pyramidale.

Figure. 1 Potentiel évoqué moteur



PCEM2

**THÈME XI
HISTOLOGIE ET
EMBRYOLOGIE DU
SYSTÈME NERVEUX
ET DES ORGANES
DES SENS**

HISTOLOGIE DU SYSTÈME NERVEUX

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. Indiquer les deux fonctions essentielles du système nerveux.
2. Citer les différentes cellules qui constituent le tissu nerveux.
3. Décrire la structure et l'ultrastructure du neurone en précisant les rapports qui existent entre sa structure et des principales fonctions.
4. Citer les différents types de neurones en se basant sur leurs prolongements.
5. Décrire une synapse chimique.
6. Indiquer comment naît, se déplace et se transmet l'influx nerveux.
7. Indiquer les caractéristiques d'une synapse électrique.
8. Décrire les différents types de cellules gliales en précisant les rôles de chacune d'elles.
9. Décrire comment se fait la myélinisation des fibres nerveuses dans le système nerveux central et dans le système nerveux périphérique.
10. Décrire une gaine de myéline.
11. Expliquer les phénomènes de dégénérescence et de régénération des fibres nerveuses.
12. Décrire un ganglion nerveux.
13. Décrire un nerf périphérique en coupe transversale et en coupe longitudinale.
14. Citer les différents types de terminaisons nerveuses en indiquant pour chacune d'elles les particularités histologiques.
15. Indiquer les constituants de la substance blanche et sa localisation au niveau des différents centres nerveux.
16. Indiquer les constituants de la substance grise et sa localisation au niveau des différents centres nerveux.
17. Décrire les méninges.
18. Décrire les plexus choroïdes et expliquer leur fonction.
19. Décrire les villosités arachnoïdiennes et expliquer leur fonction.
20. Indiquer la composition du liquide céphalo-rachidien et ses propriétés physico-chimiques et physiologiques.
21. Décrire la structure histologique de la moelle épinière sur une coupe longitudinale.
22. Décrire les différents types de neurones de la moelle épinière et indiquer les relations qu'ils établissent entre eux et avec d'autres structures nerveuses.
23. Décrire la structure histologique du cortex cérébelleux.
24. Décrire un glomérule cérébelleux.
25. Décrire la cytoarchitectonie du cortex cérébral.
26. Décrire la myeloarchitectonie du cortex cérébral.
27. Indiquer les différents types de relation entre les structures (corps cellulaires et neurites) corticales entre elles et avec les extra-corticales pour le cortex cérébral et pour le cortex cérébelleux.
28. Reconnaître sur lames et sur diapositives les différents constituants du système nerveux.

PLAN

1. INTRODUCTION

2. LES CONSTITUANTS DU TISSU NERVEUX

2.1. LE NEURONE

- 2.1.1. Caractères généraux
- 2.1.2. Le corps cellulaire
- 2.1.3. Le cytosquelette
- 2.1.4. Les neurites
- 2.1.5. Les fonctions du neurone
- 2.1.6. Classification des neurones

2.2. LES CELLULES GLIALES

- 2.2.1. La névroglie centrale
- 2.2.2. La névroglie périphérique
- 2.2.3. La gaine de myéline
- 2.2.4. Rôle de la névroglie dans les phénomènes de dégénérescence et de régénération.

3. LE SYSTÈME NERVEUX PÉRIPHÉRIQUE

3.1. LES GANGLIONS NERVEUX

3.2. LES NERFS PÉRIPHÉRIQUES

3.3. LES TERMINAISONS NERVEUSES

- 3.3.1. Les terminaisons sensitives
- 3.3.2. Les terminaisons effectrices

4. LE SYSTÈME NERVEUX CENTRAL

4.1. ORGANISATION DU TISSU NERVEUX DANS LE SYSTÈME NERVEUX CENTRAL

- 4.1.1. La substance blanche
- 4.1.2. La substance grise
- 4.1.3. Les annexes du névraxe
 - Les méninges
 - Les plexus choroïdes
 - Les toiles choroïdiennes
 - Le liquide céphalo-rachidien

4.2. LES CENTRES NERVEUX

- 4.2.1. Les techniques d'étude
- 4.2.2. La moelle épinière
- 4.2.3. Le cervelet
- 4.2.4. Le cerveau

1- INTRODUCTION

Le système nerveux a deux principales fonctions, la coordination des différents organes d'un individu et la relation entre le corps et le monde extérieur par l'intermédiaire des organes sensoriels.

Ces fonctions sont basées sur deux propriétés fondamentales des cellules nerveuses (les neurones) :

- **l'irritabilité**, c'est-à-dire, la capacité de réagir à des stimuli physiques ou chimiques en modifiant les propriétés électriques de leur membrane plasmique,
- **la conductibilité**, c'est-à-dire la capacité de transmettre très rapidement une excitation d'un endroit à un autre du corps.

Le fonctionnement du système nerveux dépend du flux d'information qui parcourt les circuits formés de réseaux de neurones, en passant d'une cellule à une autre par des points de contact spécialisés, les synapses.

Sur un plan structural, le système nerveux comporte :

- **le système nerveux périphérique (SNP)**, formé par les nerfs périphériques et les ganglions.
- **le système nerveux central (SNC)** qui comprend la moelle épinière, le cervelet et le cerveau.

Sur un plan fonctionnel, on distingue le système nerveux volontaire et le système nerveux autonome.

2- LES CONSTITUANTS DU TISSU NERVEUX

Le tissu nerveux est constitué de 2 éléments essentiels : les neurones et les cellules gliales.

Comme d'autres tissus, il comporte des vaisseaux accompagnés de tissu conjonctif.

2.1. LE NEURONE (Fig.1-2-3)

2.1.1. CARACTÈRES GÉNÉRAUX

Le neurone possède un corps cellulaire et des neurites. Les neurites sont des prolongements cellulaires du neurone. Ils sont formés par les dendrites, expansion épaisse et assez courte qui transportent le signal nerveux vers le corps cellulaire, et l'axone, unique, long et effilé qui transporte les signaux nerveux à distance du corps cellulaire.

Le neurone réagit aux variations du milieu extracellulaire en modifiant les propriétés électriques de sa membrane plasmique. Au repos, il existe une différence de potentiel d'environ - 70 mv entre la face interne et la face externe de la membrane, les concentrations en ions étant différentes dans le milieu intracellulaire et dans le milieu extracellulaire.

Lors d'un stimulus, cette différence de potentiel, appelée potentiel de repos, est inversée et devient positive (environ + 30 mv) pendant quelques millisecondes. Cette inversion est appelée potentiel d'action, et dans le cas des neurones, influx nerveux. Cet influx nerveux peut transporter un message, sans qu'il ne soit atténué, d'une extrémité à l'autre d'un neurone à une vitesse de 100 m/sec ou plus. Si la distance à parcourir est longue, il faut de l'énergie pour amplifier la perturbation membranaire au cours de son trajet.

Les fonctions de communication des neurones ne sont pas seulement dues à leur irritabilité et à leur conductibilité, mais aussi à leur structure, leurs propriétés d'intégration, ainsi qu'aux composés chimiques qu'ils synthétisent et libèrent vers d'autres neurones ou les glandes.

Ces substances sont de trois types : les neurotransmetteurs, les neuropeptides et les neurohormones.

2.1.2 LE CORPS CELLULAIRE

Il contient un noyau généralement volumineux, de forme sphérique ou ovoïde, riche en euchromatine, avec un gros nucléole central, et relativement peu d'hétérochromatine.

Ce noyau est en interphase permanente (phase Go) et le neurone ne se divise pas. S'il est détruit, il ne sera jamais remplacé.

Il contient de nombreux amas chromophiles, les corps de Nissl. Ils correspondent à des citernes du réticulum endoplasmique rugueux alternant avec des polysomes libres. L'appareil de Golgi est développé. Les dictyosomes sont disposés autour du noyau. L'abondance de l'euchromatine nucléaire et la richesse en ribosomes (corps de Nissl) reflètent l'importante activité de synthèse des cellules nerveuses. Les protéines synthétisées par les corps de Nissl sont essentielles pour les différentes activités des neurones.

Le neurone comporte des lysosomes, un réticulum endoplasmique lisse relativement développé dans le corps cellulaire et qui s'étend dans les neurites. Le neurone possède peu de réserve d'énergie et a besoin de glucose et d'oxygène. Il renferme de nombreuses mitochondries souvent associées au corps de Nissl ; on en trouve dans les dendrites ; elles sont dispersées le long de l'axone, et sont particulièrement abondantes dans les terminaisons axonales.

Tous les neurones possèdent les organites décrits plus haut. La grande majorité d'entre eux a peu d'inclusions cytoplasmiques. Certains neurones contiennent des pigments de mélanine, d'autres des granulations de lipofuscine. Ces granulations, de taille et de forme diverses, seraient des accumulations de produits de dégradation lysosomale. Les granulations de lipofuscine augmentent avec l'âge, s'accumulent dans le corps cellulaire et affectent le bon fonctionnement de la cellule.

2.1.3. LE CYTOSQUELETTE

Sur les coupes histologiques, préparées pour la microscopie optique avec des méthodes d'imprégnation argentiques, on observe dans le corps cellulaire, un réseau de neurofilaments qui s'étend dans les dendrites et dans l'axone.

Le cytosquelette du neurone est très développé. Il est formé de 3 types de structures filamenteuses : des microtubules, des neurofilaments et des microfilaments.

Les neurofilaments ont un diamètre de 8 à 10 nm, et sont constitués de l'association de 3 protéines mesurant respectivement 200, 150 et 70 kD. La protéine de 70 kD forme le corps du neurofilament, les 2 autres sont disposés en hélice autour d'elles. Les microfilaments sont des filaments d'actine. Les microtubules sont similaires à ceux des autres types cellulaires. Leur pôle positif se trouve du côté de l'extrémité de l'axone, leur pôle négatif du côté du corps cellulaire. Ils sont continuellement remaniés : ils se polymérisent au pôle positif et se dépolymérisent au pôle négatif, continuellement et à la même vitesse. La vitesse de polymérisation est identique à la vitesse de dépolymérisation.

Le cytosquelette du neurone maintient la forme de la cellule et de ses prolongements. Les microtubules jouent un rôle essentiel dans le transport des vésicules et des organites depuis le corps cellulaire vers les extrémités des neurites. Les neurofilaments sont moins dynamiques ; cependant dans certaines maladies dégénératives, telle la maladie d'Alzheimer, leurs protéines semblent modifiées.

2.1.4. LES NEURITES

Les prolongements cellulaires ou neurites, représentent probablement la caractéristique essentielle des neurones ; c'est d'eux que dépend en grande partie la capacité des cellules nerveuses à recevoir, intégrer et transmettre les messages. Leur longueur et leur forme sont très variables.

Les dendrites

Les neurones ont généralement de nombreuses dendrites qui naissent du corps cellulaire ; elles ont une base large au niveau du corps cellulaire et s'effilent progressivement. Elles se ramifient dès leur origine et leurs nombreuses collatérales se détachent à angle aigu. Le nombre et la longueur des dendrites ne sont pas en rapport avec la taille du corps cellulaire, mais les dendrites et leurs ramifications ont une organisation spatiale caractéristique de chaque type de neurone. On trouve dans les dendrites tous les organites présents dans le corps cellulaire.

La surface de certaines dendrites de neurones du système nerveux central est hérissée d'épines dendritiques. Ce sont des sites de contact synaptique.

Les dendrites reçoivent par l'intermédiaire de leurs synapses, les influx nerveux venant des axones d'autres neurones, puis les amènent au corps cellulaire. Le degré de ramifications des dendrites et le nombre de leurs épines sont en relation directe avec la capacité du neurone à intégrer des signaux venant de différentes sources.

Dans le SNC, les dendrites sont courtes et non myélinisées.

Dans le SNP, les dendrites des nerfs rachidiens sont longues et généralement myélinisées.

L'axone

L'axone naît à partir d'une extension conique du corps cellulaire, le cône d'émergence dépourvu de corps de Nissl. Plus rarement, il prend naissance à partir de la base d'une dendrite. Dans une même cellule, l'axone est généralement plus fin et beaucoup plus long que les dendrites. L'axoplasme ou cytoplasme de l'axone ne contient pas de corps de Nissl. Il renferme de nombreuses mitochondries et de nombreuses vésicules. Tous les axones possèdent en abondance des éléments du cytosquelette disposés parallèlement à leur grand axe.

La région de l'axone comprise entre le cône d'émergence et le début de la myéline est le segment initial de l'axone, caractérisé par une membrane plasmique très dense aux électrons, et par une richesse en microtubules et en neurofilaments.

Cette région, appelée aussi « zone gâchette », est l'endroit où le potentiel d'action est généré, puis propagé le long de l'axone. C'est encore là que peuvent s'établir les synapses axo-axoniques.

L'axoplasme est le siège d'une intense circulation moléculaire, dans les 2 sens, du corps cellulaire du neurone vers les terminaisons de l'axone, transport antérograde et transport rétrograde, dans le sens contraire. Plusieurs systèmes sont mis en œuvre :

- * d'une part un système de transport lent grâce auquel les substances se déplacent à partir du corps cellulaire à la vitesse d'environ 0,1 à 3 mm/jour.
- * d'autre part un système de transport plus rapide dans l'une ou l'autre direction, à des vitesses comprises entre 20 et 400 mm/jour.

Le système de transport lent assure le transport des macromolécules, précurseurs des éléments du cytosquelette. Il permet aussi le transport des enzymes solubles synthétisées dans le corps cellulaire et nécessaires aux étapes finales de la synthèse des neurotransmetteurs dans les extrémités axonales.

Le système de transport rapide intéresse de petites vésicules, des mitochondries, des tubules du réticulum endoplasmique lisse ainsi que l'actine, la myosine et la clathrine nécessaires au recyclage des membranes des vésicules synaptiques. Les vésicules contenant le neurotransmetteur spécifique d'une synapse, comme la noradrénaline, sont véhiculées par ce transport rapide.

Le transport rétrograde rapide concerne différents organites et molécules qui retournent vers le corps cellulaire où ils peuvent être dégradés dans les lysosomes, et les facteurs de croissance qui peuvent y exercer leurs effets.

Ces différents types de transport semblent mettre en œuvre les nombreuses protéines fibrillaires et leur mouvement nécessite de l'énergie fournie par les mitochondries qui se déplacent également le long des microtubules.

En suivant le transport le long de l'axone de protéines marquées par des éléments radioactifs, on a pu déterminer les connexions anatomiques précises entre les neurones du cerveau. On peut également tracer les connexions entre les terminaisons nerveuses d'un neurone situé dans une région du cerveau et le corps cellulaire de ce même neurone situé dans une autre région, au moyen d'une enzyme, la peroxydase de raifort, qui a la propriété d'être rapidement transporté par le flux axonal rétrograde.

2.1.5. LES FONCTIONS DU NEURONE

L'influx nerveux

L'influx nerveux est une onde de dépolarisation membranaire qui se déplace le long de l'axone. Dans un neurone au repos, la face interne de la membrane est négative, la face externe est positive : la membrane est polarisée.

Lors d'un stimulus, les canaux Na^+ s'ouvrent permettant la pénétration d'ions Na^+ dans la cellule. La concentration en ions chargés positivement augmente à l'intérieur de la cellule, la membrane est dépolarisée au site de la stimulation, la différence de potentiel est inversée.

Le mouvement des ions à travers la membrane engendre un signal électrique appelé potentiel d'action (environ + 30 mV) qui se déplace de proche en proche le long de la membrane. La pénétration massive d'ions Na^+ entraîne l'ouverture de canaux K^+ et la sortie d'ions K^+ , vers le milieu extracellulaire selon son gradient de concentration, ce qui rétablit le potentiel de membrane. Les canaux Na^+ se ferment au fur et à mesure du déplacement de l'onde de dépolarisation. La propagation du potentiel d'action est unidirectionnelle, la fermeture des canaux Na^+ dans le site repolarisé est suivie d'une période d'inactivation de ces canaux ioniques, ce qui empêche la propagation rétrograde de l'onde de dépolarisation.

Lorsque l'influx nerveux est transmis à travers les synapses, un neurotransmetteur ou ligand, est libéré par le neurone, se lie à des récepteurs membranaires du neurone cible. Ceci provoque l'ouverture de canaux ioniques, ce qui entraîne soit une dépolarisation stimulatrice soit une hyperpolarisation inhibitrice.

La dépolarisation ou l'hyperpolarisation, résultant de l'ouverture ou de la fermeture des canaux ioniques liés aux récepteurs, se déplacent vers la zone gâchette où leurs effets s'additionnent en fonction du temps et de l'espace. Lorsque leur somme atteint le seuil de - 55 mV, les canaux Na^+ concentrés dans cette zone, s'ouvrent ; la membrane se dépolarise alors très rapidement, générant un potentiel d'action. Il est de type « tout ou rien » et son seuil est donc identique pour tous les neurones ; sa fréquence et sa durée sont les seules informations que chaque neurone puisse coder.

Les synapses (Fig. 4-5-6)

Chaque neurone reçoit des informations venant d'autres neurones, les intègre et transmet des signaux à d'autres neurones ou à des cellules effectrices. Ceci est possible grâce à la conduction axonale de l'influx nerveux et à la transmission synaptique. Le site de transmission est la synapse. On distingue deux modes de transmission synaptique : électrique et chimique.

On définit la synapse chimique comme une zone de contact hautement spécialisée qui assure la transmission de l'influx nerveux d'un neurite à l'autre, d'un neurite au corps cellulaire d'un neurone, ou d'un neurite à des cellules effectrices comme les cellules musculaires et glandulaires. Cette transmission est assurée par l'intermédiaire de neurotransmetteurs.

Une synapse chimique est formée de trois éléments : un élément présynaptique et un élément postsynaptique séparés par une fente synaptique d'environ 20 à 30 nm.

L'élément présynaptique ou « bouton synaptique », plus ou moins protégé des prolongements de cellules gliales, contient des mitochondries et de nombreuses vésicules synaptiques. La membrane présynaptique présente, sur le versant cytoplasmique, des structures coniques denses aux électrons associées à des vésicules synaptiques. L'élément postsynaptique est une région épaissie de la membrane de la cellule effectrice.

Lorsqu'un potentiel d'action atteint le « bouton synaptique », les canaux calciques de la membrane s'ouvrent, le calcium pénètre dans la terminaison axonale, l'exocytose des vésicules synaptiques s'effectue, libérant le neurotransmetteur dans la fente synaptique, induisant la stimulation ou l'inhibition du second neurone ou de la cellule effectrice.

Après l'exocytose des vésicules synaptiques, l'excès de membrane est éliminé par endocytose dans des puits recouverts au niveau de l'élément présynaptique. La plus grande partie de la membrane est ainsi recyclée dans la terminaison nerveuse. L'endocytose et le recyclage des membranes requièrent de l'énergie fournie par les mitochondries.

Les synapses sont polarisées : l'influx passe toujours de l'élément présynaptique à l'élément postsynaptique.

Il existe de nombreux types de neurotransmetteurs. Certains ont un effet spécifique, comme le GABA qui est toujours inhibiteur. D'autres, comme l'acétylcholine, inhibent ou stimulent, selon la nature du récepteur postsynaptique.

L'efficacité synaptique dépend du catabolisme rapide du neurotransmetteur après stimulation de la cellule postsynaptique. Dans la synapse neuromusculaire, l'acétylcholinestérase assure cette fonction.

Dans la plupart des synapses entre neurones, l'excès du neurotransmetteur est récupéré et dégradé par le neurone présynaptique. Certains médicaments antidépresseurs agissent en inhibant cette récupération et en augmentant donc la quantité du neurotransmetteur dans la fente synaptique.

Les synapses sont des structures très dynamiques. Elles se déplacent et modifient constamment leurs contacts. Leurs modifications de taille, de forme et de situation répondent à divers facteurs tels que l'apprentissage.

Les synapses électriques ne sont pas propres aux cellules nerveuses ; elles relient d'autres types cellulaires, comme les cellules musculaires cardiaques, les cellules musculaires lisses. Dans le tissu nerveux, elles sont moins fréquentes que les synapses chimiques.

Dans une synapse électrique, les éléments pré- et postsynaptiques sont réunis par des jonctions communicantes qui permettent le passage direct des ions d'une cellule à une autre. La transmission de l'excitation y est beaucoup plus rapide que dans les synapses chimiques.

2.1.6. CLASSIFICATION DES NEURONES (FIG. 7)

Selon le nombre et la disposition des prolongements, on distingue différents types de neurones :

- les neurones unipolaires comme le neuroblaste et certaines cellules de la rétine (cellules horizontales et amacrines). Ils sont munis d'un prolongement unique qui se divise, non loin du corps cellulaire en deux branches.
- Les neurones pseudo-unipolaires, comme le neurone en T du ganglion rachidien dont le prolongement unique a valeur de dendrite et d'axone.
- Les neurones bipolaires, à deux prolongements, comme la cellule de Purkinje du cortex cérébelleux ou la cellule bipolaire de la rétine.
- Les cellules multipolaires avec un axone et plusieurs dendrites. Ils sont classés en deux groupes selon la longueur de leur axone :
 - Cellules multipolaires à axone long : cellule pyramidale du cortex cérébral, motoneurone de la moelle.
 - Cellules multipolaires à axone court : grains du cervelet, Golgi II.

2.2 LES CELLULES GLIALES:

Les cellules gliales sont les cellules de soutien du tissu nerveux. Elles sont 10 fois plus nombreuses que les neurones. On distingue : les cellules gliales du système nerveux central qui forment la névroglie centrale, et les cellules gliales du système nerveux périphérique qui forment la névroglie périphérique.

2.2.1. LA NÉVROGLIE CENTRALE (FIG. 8)

Les cellules gliales du SNC sont les astrocytes, les oligodendrocytes, les cellules épendymaires et la microglie.

Les astrocytes

Ce sont les cellules les plus fréquentes du système nerveux central. Ils possèdent de nombreux et longs prolongements se développant à partir du corps cellulaire. Chaque prolongement se termine par une dilatation terminale qui s'étale sur le corps cellulaire d'un neurone, sur un neurite, sur un vaisseau sanguin, sur un autre astrocyte ou encore sur la face interne de la méninge qui enveloppe le cerveau. Leur cytoplasme contient des filaments intermédiaires caractéristiques, les gliofilaments. Les astrocytes, PAS + renferment l'essentiel du glycogène du système nerveux central (SNC) et sont capables d'effectuer sa synthèse et son catabolisme.

On distingue 2 types d'astrocytes : les astrocytes protoplasmiques dont les prolongements sont courts, épais et peu ramifiés, et les astrocytes fibreux dont les prolongements sont fins et longs. Les astrocytes protoplasmiques et les astrocytes fibreux correspondent probablement au même type cellulaire, leur forme variant selon leur localisation dans le tissu nerveux.

Les prolongements astrocytaires forment autour des vaisseaux un manchon, la membrane limitante gliale, périvasculaire, qui recouvre la surface des capillaires, mais reste séparée de l'endothélium par un petit espace périvasculaire. D'autres prolongements s'accrochent aux neurones et s'insinuent même près des fentes synaptiques. Chaque astrocyte forme ainsi avec un neurone et un vaisseau une unité angio-glio-neurale où s'effectuent les échanges métaboliques entre le sang et le neurone (nutrition et élimination des déchets).

Les capillaires du SNC sont de type continu ; les cellules endothéliales sont réunies par des jonctions serrées. Elles reposent sur une lame basale continue et constituent la barrière hémato-encéphalique. Toute molécule doit trouver son récepteur spécifique pour passer à travers les cellules endothéliales. La barrière hémato-encéphalique s'oppose au passage de certaines substances et même de certains ions. C'est ainsi que certains médicaments ne peuvent atteindre les cellules nerveuses que s'ils sont injectés dans les espaces méningés.

Les astrocytes jouent un rôle important dans l'homéostasie au niveau du SNC. Ils ont par exemple la propriété de capter les ions K⁺ qui s'accumulent dans les espaces intercellulaires et pourraient perturber le fonctionnement des neurones. Les ions K⁺ peuvent être transportés d'astrocytes en astrocytes, grâce aux jonctions communicantes entre ces cellules, sur des distances considérables.

Les astrocytes absorbent le surplus de molécules de neuromédiateurs présents autour des neurones, les protégeant ainsi de stimulations excessives.

Les astrocytes interviennent dans la régulation du débit sanguin dans le SNC.

Ils servent de guides aux cellules nerveuses dans leur migration au cours du développement embryonnaire.

Les astrocytes remplissent les espaces laissés libres après la mort des neurones.

Les oligodendrocytes

L'oligodendrocyte est une petite cellule, à noyau dense et à prolongements courts. Le cytoplasme contient un réticulum endoplasmique granulaire et un appareil de Golgi développé et de nombreuses mitochondries. On distingue deux types d'oligodendrocytes : les oligodendrocytes responsables de la myélinisation des fibres nerveuses dans le SNC et les oligodendrocytes satellites, petites cellules étroitement associées au corps cellulaire des neurones dans le SNC.

Les cellules épendymaires

Les cellules épendymaires tapissent les cavités du SNC : le canal épendymaire de la moelle épinière, les ventricules et les communications interventriculaires de l'encéphale. Elles participent à la barrière LCR-encéphale, beaucoup plus perméable que la barrière hémato-encéphalique. Elles forment généralement une assise de cellules cubiques plus ou moins hautes réunies par des desmosomes.

Ces cellules possèdent des cils et des microvillosités à leur pôle apical, des invaginations de la membrane plasmique à leur pôle basal, et de nombreuses mitochondries. Elles participent à la sécrétion du LCR. Elles ne sont pas séparées du tissu nerveux par une lame basale.

La microglie

Elle est constituée de petites cellules à cytoplasme très dense, riches en lysosomes et pourvues de prolongements courts et tortueux. Ces cellules sont dispersées dans le SNC. Les cellules microgliales forment un vaste réseau de défense du tissu nerveux. Elles sont en contact avec les neurones et les astrocytes.

Ce sont des cellules très mobiles, ce qui leur permet de se déplacer facilement dans le tissu nerveux jusqu'aux régions lésées où elles phagocytent les cellules ou les fragments cellulaires à éliminer. Les cellules microgliales sont les macrophages spécifiques du SNC. Les cellules microgliales sont des cellules immunitaires. Elles produisent des antigènes du complexe majeur d'histocompatibilité de classe II ; par conséquent elles sont vraisemblablement des cellules présentatrices d'antigènes.

Ces cellules sont indispensables au bon développement de l'embryon. Elles sécrètent des facteurs de croissance importants pour le SNC.

Lorsqu'elles sont activées, les cellules microgliales produisent des cytokines et des protéases. Ces phénomènes favorisent l'élimination des micro-organismes infectieux et des cellules anormales, mais risquent aussi d'endommager des cellules

saines. Une activité microgliale excessive provoquerait ou potentialiserait diverses pathologies, tels des accidents vasculaires cérébraux, la maladie d'Alzheimer, la sclérose en plaques, la démence associée au SIDA et d'autres maladies dégénératives.

2.2.2. LA NÉVROGLIE PÉRIPHÉRIQUE

Elle comprend les cellules capsulaires et les cellules de Schwann.

Les cellules capsulaires sont petites, à noyau dense et ovoïde. Leur cytoplasme est peu abondant. Les cellules capsulaires, appelées aussi cellules satellites, forment une couche continue autour des corps cellulaires des neurones des ganglions nerveux.

Les cellules de Schwann sont associées les unes aux autres en un manchon tout le long des neurites : elles forment la gaine de Schwann. Leur noyau ovalaire est habituellement situé au centre du cytoplasme finement granulaire. L'abondance des mitochondries, des ribosomes et du réticulum endoplasmique rugueux témoigne de l'intensité des activités métaboliques. Une lame basale tapisse la face externe de chaque cellule de Schwann. L'aspect de la cellule de Schwann et du complexe neurite-schwannien varie selon que les neurites sont myélinisés ou non.

Le neurite myélinisé est simplement logé dans une invagination de la membrane plasmique de la cellule de Schwann. Une seule cellule entoure souvent plusieurs neurites myélinisés. Plusieurs cellules de Schwann se succèdent le long d'un neurite myélinisé c'est-à-dire qu'un neurite myélinisé est entouré par une succession de cellules de Schwann. Le cas du neurite myélinisé est traité dans le paragraphe suivant.

La gaine de Schwann est indispensable à la survie de l'axone et à son fonctionnement normal dans le système nerveux périphérique (SNP). En cas de section d'un nerf ou de traumatisme, la gaine de Schwann est également indispensable pour la régénération du nerf.

2.2.3. LA GAINE DE MYÉLINE (FIG. 9)

Dans le SNP, il n'existe qu'un seul neurite myélinisé par cellule de Schwann. Il est enveloppé par une gaine de myéline plus ou moins épaisse. Cette gaine provient d'un enroulement de la membrane plasmique de la cellule gliale autour du neurite.

Au début de l'enroulement, les feuillettes externes de la membrane fusionnent pour former le mésaxone. Au cours de l'enroulement, du cytoplasme persiste entre les spires. À la fin de l'enroulement, les spires s'accolent, les feuillettes internes des membranes fusionnent et le cytoplasme est rejeté. La myéline apparaît alors en microscopie électronique comme une alternance de lignes sombres et d'espaces clairs : les lignes minces, intrapériodiques proviennent de la fusion des feuillettes externes ; les lignes épaisses, périodiques, résultent de la fusion des feuillettes internes et sont séparées les uns des autres par des intervalles de 12 nm. Un peu de cytoplasme persiste, entre les feuillettes internes, au niveau des incisures de Schmidt-Lanterman. Le cytoplasme et le noyau de la cellule de Schwann sont à l'extérieur de la gaine de myéline. La cellule de Schwann est entourée par une lame basale.

La myéline est essentiellement composée de phospholipides. En microscopie optique, son aspect est clair, car la majorité des lipides ont été extraits au cours de l'enrobage à la paraffine.

La gaine de myéline est discontinue. Entre deux cellules de Schwann, le neurite est uniquement entouré par la lame basale ; ces intervalles sont les nœuds de Ranvier. Les cellules de Schwann successives sont reliées entre elles par des jonctions communicantes.

Le nœud de Ranvier intervient dans la conduction saltatoire de l'influx nerveux : la conduction de l'influx nerveux ne se fait pas d'une manière continue au niveau du neurite, mais d'un nœud de Ranvier à un autre ; ceci a pour effet d'augmenter la vitesse de conduction qui peut ainsi atteindre 100 m/s dans les grosses fibres myélinisées, alors qu'elle est limitée à 2 m/s environ dans les fibres non myélinisées.

Dans le SNC, ce sont les oligodendrocytes qui sont responsables de la myélinisation des neurites. Dans chaque segment internodal, la gaine de myéline est formée par l'enroulement de la membrane plasmique d'un oligodendrocyte autour de l'axone. Cependant un oligodendrocyte peut contribuer à la myélinisation de plusieurs axones. Comme dans le SNP, la gaine de myéline est interrompue au niveau des nœuds de Ranvier.

2.2.4. RÔLE DE LA NÉVROGLIE DANS LES PHÉNOMÈNES DE DÉGÉNÉRESCENCE ET DE RÉGÉNÉRATION (FIG. 10)

Les cellules de la névroglie interviennent au cours de la dégénérescence et de la régénération dans le SNC et dans le SNP.

- Dans le SNC, après une lésion, la microglie joue le rôle de macrophage. Au cours des dégénérescences, les astrocytes prolifèrent et envahissent les espaces libres par les neurones. Les cellules microgliales sont capables de phagocyter les débris et peuvent également participer à la réaction inflammatoire et à la réponse immune.
- Dans le SNP, l'étude des nerfs traumatisés a permis de comprendre les mécanismes des dégénérescences et de la régénération, et de faire progresser la microchirurgie réparatrice.

Au moins 2 types de dégénérescences sont décrits :

- les dégénérescences rétrogrades et wallérienne :

Lorsque l'axone d'un neurone est sectionné, les 2 morceaux d'axone situés de part et d'autre de la section subissent des modifications. La partie proximale subit des transformations : le corps cellulaire augmente de volume, ce qui indique une

souffrance cellulaire. L'extrémité de l'axone au niveau de la section se cicatrise. C'est la dégénérescence rétrograde. La partie distale de l'axone sectionné dégénère ; les cellules de Schwann et la gaine de myéline qui l'entoure se modifient. La gaine de myéline dégénère et tend à disparaître : c'est la dégénérescence wallérienne. Les cellules de Schwann se désorganisant tout en restant à proximité.

Si la section a été nette sans écrasement de la partie sectionnée et si les parties proximale et distale sont restées placées approximativement face à face, l'axone peut repousser. Il est essentiel pour que la repousse ait lieu que la laminine et certaines autres protéines des lames basales soient bien conservées. L'extrémité cicatrisée de l'axone pousse diverses petites ramifications qui cherchent un canal schwannien. L'extrémité axonale qui trouve un canal schwannien deviendra le futur axone autour duquel les anciennes cellules de Schwann se réalignent et reforment la gaine de myéline. Les internodes nouvellement formés sont plus courts que les anciens internodes. Lorsqu'on observe une fibre nerveuse, la taille des internodes permet de reconnaître s'il y a eu régénération de l'axone et remyélinisation par les cellules de Schwann.

- Dégénérescence segmentaire :

Certaines maladies du système nerveux touchent certaines cellules de Schwann. Si deux cellules de Schwann sont remplacées par exemple par trois autres cellules qui assurent une nouvelle myélinisation, les internodes correspondants seront plus courts que les autres internodes de la fibre situés de part et d'autres de cette zone de régénération.

3. LE SYSTÈME NERVEUX PÉRIPHÉRIQUE

Le système nerveux périphérique comprend les ganglions, les nerfs et les terminaisons nerveuses.

3.1. LES GANGLIONS NERVEUX (Fig. 10)

Le ganglion nerveux se compose de corps cellulaires accompagnés de leurs cellules gliales capsulaires, et des neurites, avec leurs propres cellules gliales, qui le traversent ou qui s'y terminent en y formant des synapses. La cellule ganglionnaire est volumineuse, son noyau est clair, sa chromatine est dispersée et le nucléole est bien visible. Son cytoplasme, abondant, est basophile. On y retrouve des corps de Nissl, un appareil de Golgi développé et de nombreux filaments.

La cellule capsulaire ou cellule satellite a un cytoplasme peu abondant et un noyau ovoïde, riche en hétérochromatine. Les cellules capsulaires forment autour des neurones une couche continue doublée par une lame basale. Elles interviennent dans les échanges métaboliques du neurone.

Entre les neurones entourés de leurs cellules gliales se trouvent du tissu conjonctif et des capillaires sanguins. Le ganglion est entouré d'une capsule conjonctive dense, vascularisée, qui se prolonge avec l'enveloppe conjonctive des nerfs qui traversent le ganglion ou qui aboutissent au ganglion.

On distingue différents types de ganglions :

- **Les ganglions rachidiens** ou spinaux, situés sur la racine dorsale des nerfs rachidiens, issus de la moelle épinière. Leurs neurones sont sensitifs, appelés neurone en T. ils sont pseudo-unipolaires : leur corps cellulaire donne naissance à un prolongement unique, à valeur d'axone et de dendrite. Le noyau est central.
- **Les ganglions du système nerveux autonome** ou neurovégétatif comportent des neurones multipolaires, plus petits que les neurones des ganglions spinaux et entourés de cellules capsulaires. Les corps cellulaires entourés de leurs cellules capsulaires sont souvent séparés les uns des autres par de nombreux neurites dont certains traversent le ganglion sans y faire synapse. Le noyau n'est pas toujours central.

3.2. LES NERFS PÉRIPHÉRIQUES (Fig. 11, 12)

Les nerfs sont des associations de complexes neurito-schwanniens, myélinisés ou non myélinisés, rassemblés en un ou plusieurs faisceaux.

Chaque faisceau est entouré par une couche de tissu conjonctif vascularisé, le périnèvre.

Le périnèvre est très dense, et comporte plusieurs couches de cellules aplaties, d'allure fibroblastiques entre lesquelles on trouve des fibres de collagène et des fibres élastiques. Ces cellules peuvent présenter entre elles des jonctions serrées. Le périnèvre constitue une barrière, empêchant le passage, à l'intérieur du faisceau, des traceurs, des colorants, ou des toxines.

À l'intérieur du faisceau, **l'endonèvre** est une mince couche de tissu conjonctif, comportant des fibres de collagène, des fibroblastes, des macrophages, des mastocytes et des capillaires, qui sépare les complexes neurito-schwanniens. Les capillaires sont de type continu.

La couche la plus externe du nerf est **l'épinèvre**. Elle entoure le nerf et envoie des expansions à l'intérieur du nerf pour séparer les faisceaux si le nerf est formé de plus d'un faisceau.

L'épinèvre est une couche relativement épaisse de tissu conjonctif dense dans lequel prédominent les fibres de collagène

à orientation longitudinale. Il contient des fibroblastes, des adipocytes et des mastocytes près des parois des vaisseaux sanguins. Aux extrémités proximales des nerfs spinaux et crâniens, l'épînèvre est en continuité avec la dure-mère.

Les fibres nerveuses qui constituent les nerfs périphériques sont classées selon leur diamètre (la vitesse de l'influx nerveux augmente avec l'épaisseur des fibres) et selon qu'elles sont myélinisées ou non.

3.3 LES TERMINAISONS NERVEUSES :

L'extrémité d'une fibre nerveuse, qu'elle soit sensitive ou motrice, intervient dans une synapse ou une terminaison nerveuse dans un organe périphérique. Près de la terminaison, le nerf ramifie et ses enveloppes deviennent de plus en plus fines. L'épînèvre disparaît totalement. Le périnèvre et l'endonèvre sont réduits à une fine couche fibrillaire.

3.3.1. LES TERMINAISONS SENSITIVES (FIG. 13, 14)

La terminaison sensitive est le début d'une dendrite. C'est un récepteur qui convertit les stimuli du milieu interne ou externe en influx nerveux qui sont transmis aux corps cellulaires. Il existe trois classes de terminaisons sensibles : les terminaisons libres ou nues, les terminaisons encapsulées sans support et les terminaisons encapsulées avec support.

- **La terminaison libre** représente la forme la plus simple de récepteur sensitif. C'est l'extrémité d'une dendrite ayant perdu toutes ses gaines et ramifiée en plusieurs branches, toutes terminées par une dilatation en forme de bouton. Les terminaisons libres sont nombreuses dans les tissus où la sensibilité est particulièrement développée : l'épithélium de la cornée, la bouche, l'épiderme.... Elles recueillent de manière peu sélective les stimuli mécaniques ou thermiques.
- **La terminaison encapsulée sans support** est totalement séparée du tissu environnant par une capsule d'épaisseur variable composée de tissu conjonctif et de cellules aplaties, comme le corpuscule de Vater-Pacini, le corpuscule de Meissner, etc.
- **Les terminaisons encapsulées avec support** contiennent dans leur capsule des éléments du tissu où elles se trouvent. Ces éléments, cellules musculaires dans le fuseau neuromusculaire ou fibres conjonctives dans l'organe myotendineux de Golgi, sont intimement associés à l'extrémité de la dendrite enroulée autour d'eux.
- **La structure neuroépithéliale** est l'association de dendrite et de cellules épithéliales qui reçoivent le stimulus. On observe ce genre de structure dans l'oreille (cellules auditives ciliées), la peau (cellules de Merkel) et la langue (cellules des bourgeons gustatifs).

3.3.2. LES TERMINAISONS EFFECTRICES (FIG. 14)

Les terminaisons effectrices sont les extrémités des axones. Elles provoquent ou modulent la contraction du tissu musculaire ou règlent la sécrétion des glandes.

Dans les glandes, les terminaisons effectrices proviennent des fibres non myélinisées du système neurovégétatif. Elles s'anastomosent en réseau en dehors de la lame basale des cellules glandulaires. De ce réseau partent des ramifications qui traversent la lame basale et se terminent par une dilatation qui s'insère dans une invagination de la membrane plasmique de la cellule glandulaire.

Dans le muscle lisse, où les fibres effectrices stimulent la contraction ou le relâchement, les terminaisons dérivent de fibres nerveuses myélinisées qui se ramifient aux nombreuses branches à extrémités dilatées riches en vésicules synaptiques. Les terminaisons se terminent à distance des cellules musculaires.

Dans le muscle squelettique, la terminaison effectrice ou motrice est très spécialisée. L'axone myélinisé d'un motoneurone est les cellules musculaires qu'il innerve constituent une unité motrice. La jonction entre une terminaison axonale est une cellule musculaire est une plaque motrice.

4. LE SYSTÈME NERVEUX CENTRAL

Le système nerveux central ou névraxe comprend l'encéphale, enfermé dans la boîte crânienne, et la moelle épinière qui occupe toute la longueur du canal vertébral. Il est symétrique par rapport au plan sagittal médian.

Cette symétrie est totale du point de vue morphologique, mais partielle du point de vue fonctionnel. Les deux hémisphères cérébraux et cérébelleux ont exactement la même structure, chacun assurant l'innervation sensitive ou motrice de la moitié du corps du côté opposé. Certains centres cependant, comme celui du langage, ne sont localisés que dans les hémisphères dominants, à gauche chez le droitier et à droite chez le gaucher. La moelle est également divisée en deux parties symétriques par rapport au plan médian ; l'innervation qu'elle assure n'est pas croisée.

Le système nerveux central est organisé en substance blanche et en substance grise. Il est enveloppé par les méninges.

4.1. ORGANISATION DU TISSU NERVEUX DANS LE SYSTÈME NERVEUX CENTRAL

4.1.1. LA SUBSTANCE BLANCHE (FIG. 15)

La substance blanche est constituée par l'ensemble des neurites myélinisés qui parcourent le système nerveux central dans toutes les directions et sont associés en faisceaux. Son aspect blanchâtre est dû à la myéline. Elle comporte également des cellules gliales (oligodendrocytes, astrocytes fibreux et cellules microgliales). La vascularisation est développée. La substance blanche est périphérique dans la moelle épinière et centrale dans le cervelet et le cerveau.

4.1.2. LA SUBSTANCE GRISE :

La substance grise a une localisation centrale dans la moelle épinière. Dans l'encéphale elle est localisée dans les noyaux gris profonds et dans le cortex périphérique du cervelet et du cerveau. Elle est constituée de neurones, de neurites, de cellules gliales et est vascularisée.

La taille et la forme des neurones dans le système nerveux central varient en fonction de leur localisation et de leur fonction : la cellule pyramidale ou neurone de Betz et spécifique du cortex cérébral ; son corps cellulaire est pyramidal ; l'axone très long est issu de sa base tandis que les dendrites relativement courtes et très ramifiées émergent de ses angles.

La cellule de Purkinje est un neurone de cervelet dans le corps cellulaire est en forme de poire. Les dendrites ont de très nombreuses collatérales disposées en espalier. L'axone très long est issu de la base. Les neurones de type Golgi I sont multipolaires ; leur corps cellulaire est étoilé et leur axone est long myélinisé.

Les neurones de type Golgi II sont multipolaires et leur axone est court et non myélinisé. Ce sont des neurones d'association.

Certains neurones, appelés grains ou cellules granulaires, sont petits ; leur noyau occupe presque tout le cytoplasme et leurs dendrites sont courtes.

4.1.3. LES ANNEXES DES NÉVRAXES

L'encéphale et la moelle épinière sont enveloppés par deux méninges qui baignent dans le liquide céphalo-rachidien (LCR) réparti dans deux compartiments intercommunicants, les ventricules et les espaces leptoméningés.

Les méninges (Fig. 17, 18, 19)

Elles comportent la méninge externe ou pachyméninge ou dure-mère, et les méninges molles ou leptoméninges, formées par l'arachnoïde et la pie-mère.

La dure-mère

Elle est séparée des os du crâne et de la colonne vertébrale par un espace épidural réel (extradural) sauf en certains points d'adhérence au niveau de la boîte crânienne.

Elle est séparée de l'arachnoïde sous-jacente par un espace sous-dural virtuel, qui peut se remplir de sang lors des hémorragies méningées.

La dure mère est constituée par un tissu conjonctif dense riche en cellules et en vaisseaux sanguins. Sur sa face interne, elle est revêtue par une assise de fibroblastes aplatis jointifs. Elle renferme des lacs et des sinus veineux bordés de cellules endothéliales reposant sur une lame basale.

L'arachnoïde

Elle est constituée par une assise de cellules fibroblastiques jointives, et d'une couche interne formée de cellules orientées plus ou moins perpendiculairement à la couche externe traversant l'espace sous-arachnoïdien (situé entre pie-mère et couche externe). Ces cellules forment un système de trabécules qui délimitent des cavités, les espaces sous-arachnoïdiens, remplis de LCR. Ces espaces sont ainsi bordés par des cellules arachnoïdiennes ne reposant pas sur une lame basale.

L'arachnoïde envoie des protrusions dans les lacs et sinus veineux de la dure-mère, les corpuscules de Paccioni, ou villosités arachnoïdiennes. Ces protrusions sont constituées par un tissu conjonctif lâche en contact avec la lame basale de l'endothélium des sinus veineux. Elles comportent des espaces sous-arachnoïdiens.

La pie-mère

Elle adhère au système nerveux central dont elle épouse tous les replis. Elle est constituée de fibroblastes modifiés, de fines fibres de réticuline et de fibres élastiques.

Elle n'est jamais en contact avec les neurones. Elle est séparée du tissu nerveux par une lame basale sur laquelle viennent s'appliquer les prolongements d'astrocytes. Ces prolongements sont liés les uns aux autres par des jonctions adhérentes. À ce niveau-là des échanges se font entre tissus nerveux et LCR.

Les plexus choroïdes (Fig. 20)

Ce sont des évaginations de la pie-mère dans la lumière des ventricules III et IV. Leur axe est constitué de tissu conjonctif lâche comportant de nombreux capillaires fenêtrés. Les cellules endothéliales des capillaires sont pourvues de pores munis de diaphragmes.

Les plexus choroïdes sont revêtus par une couche de cellules choroïdes cubiques. Leur pôle apical est hérissé de nombreuses microvillosités et présente des cils. Leur membrane plasmique, du côté du pôle basal, est très invaginée. Entre les invaginations se disposent des mitochondries, ce qui témoigne de l'existence d'échanges métaboliques intenses entre tissu conjonctif et cellules choroïdes.

Les cellules choroïdes sont unies entre elles par des complexes de jonction (avec jonctions étanches) et reposent sur une lame basale continue.

Les plexus choroïdes sont souvent recouverts par des cellules épiplexuelles (cellules macrophagiques)

Les toiles choroïdiennes (Fig. 20)

Elles sont localisées dans les régions amincies du névraxe : les parois dorsales des ventricules II et IV et la paroi médiane des ventricules latéraux. Elles se composent de leptoméninges, d'une lame basale, de cellules gliales formant une membrane « tectoria » et de cellules épendymaires.

Le liquide céphalo-rachidien

Toutes les cavités du système nerveux central communiquent entre elles, contiennent du LCR, et sont bordées par des cellules épendymaires (glie épendymaire). Ces cavités (ventricules et canal épendymaire) communiquent avec les espaces leptoméningés (espaces sous-arachnoïdiens) par deux ouvertures, les trous de Luschka et de Magendie situées dans le toit du quatrième ventricule.

Le LCR est élaboré par les cellules des plexus choroïdes, des toiles choroïdiennes, et par les cellules épendymaires.

Il circule des ventricules latéraux vers le quatrième ventricule, d'où il rejoint les espaces sous-arachnoïdiens. Il est résorbé vers les sinus et lacs veineux au niveau des corpuscules de Paccioni.

Le LCR se renouvelle 4 à 5 fois par jour. Son volume total est d'environ 150 millilitres. Il joue un rôle d'amortisseur, protégeant le tissu nerveux de tout traumatisme.

La composition du LCR diffère selon le lieu du prélèvement. C'est un liquide clair, limpide et isotonique qui contient les mêmes électrolytes que le milieu interstitiel, et des protéines. Il renferme du glucose et quelques lymphocytes.

4.2. LES CENTRES NERVEUX

Ils comprennent la moelle épinière et l'encéphale. L'encéphale est formé du tronc cérébral, du cervelet et du cerveau. Le tronc cérébral est en continuité avec la moelle épinière.

4.2.1. TECHNIQUES D'ÉTUDE

Les techniques d'étude du SNC sont multiples. Les techniques histologiques sont à corrélées avec des études physiologiques, biochimiques et anatomiques.

Histologie

Les colorations classiques (hématoxyline-éosine, trichromes, P.A.S....) apportent peu d'information. Des techniques particulières au SNC ont été développées :

coloration de Nissl qui met en évidence les corps cellulaires des neurones, des cellules gliales, des cellules endothéliales, en colorant l'ARN (en bleu).

coloration de Woelcke qui colore les gaines de myéline (en noir) des fibres myélinisées.

coloration de Golgi et ses dérivés qui mettent en évidence quelques corps cellulaires seulement, et leurs prolongements. Les coupes sont, dans ce cas, épaisses, afin de pouvoir suivre les prolongements sur une bonne longueur.

Techniques d'immunohistochimie qui mettent en évidence les substances présentes dans les cellules nerveuses et gliales (enzymes, protéines du cytosquelette, peptides, neurotransmetteurs...).

Techniques de microscopie électronique qui permettent d'observer toutes les structures, y compris les synapses.

Expérimentations

La neuroanatomie animale a permis, expérimentalement, de mettre en évidence des circuits anatomiques grâce à des techniques de destruction focalisées, analysées ensuite par des techniques de neurohistologie courante pour l'examen aux microscopes optique et électronique. On peut observer les terminaisons axonales dégénérées en ultrastructure.

Des voies ont été mises en évidence en utilisant les courants orthograde et rétrograde que suivent les substances radioactives ou la peroxydase du raifort... Dans le cerveau humain, si certaines voies nerveuses sont détruites, les colorations myéliniques par exemple, montreront, à la place de la voie qui devrait être colorée, une région blanchâtre.

Ces techniques permettent en général de localiser les terminaisons d'un neurone donné, et ainsi de préciser les réseaux.

4.2.2. MOELLE ÉPINIÈRE (FIG. 21, 22, 23)

La moelle épinière est située dans le canal vertébral et s'étend depuis la première vertèbre cervicale jusqu'à la seconde vertèbre lombaire. Elle est cylindrique et divisée en deux par un sillon ventral et un sillon dorsal. Elle est composée de substance grise centrale et de substance blanche périphérique. Deux renflements, l'un cervical et l'autre lombaire, correspondent à l'émergence des racines nerveuses destinées aux membres supérieurs et inférieurs.

Dans la substance blanche, les faisceaux de fibres nerveuses myélinisées sont regroupés en cordons. Ces faisceaux, dont l'épaisseur augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche de la région craniale, assurent la conduction des influx nerveux ascendants et descendants. Les influx ascendants sont sensitifs et transportés par les cordons dorsaux ou latéraux. Les cordons descendants sont moteurs, la plupart sont ventraux.

En coupe transversale, la substance grise a l'aspect d'un H dont les branches sont les cornes antérieures et postérieures et dont la partie transversale, la commissure grise, est traversée par le canal épendymaire. Dans la région dorso-lombaire, il existe aussi une corne médio-latérale, accolée à la face externe de la corne antérieure. Les fibres qui partent de l'extrémité des cornes ventrales et dorsales rejoignent les racines des nerfs rachidiens.

Les cornes ventrales (antérieures), plus volumineuses, sont composées de motoneurones et sont donc effectrices : l'influx nerveux est généré par des cellules multipolaires volumineuses, les motoneurones alpha, ou par des cellules plus petites, les motoneurones gamma.

Les axones des motoneurones alpha innervent les cellules musculaires squelettiques ; les axones des motoneurones gamma innervent les fuseaux musculaires. Les dendrites des motoneurones sont courtes et en relation avec des neurones-relais de la corne dorsale ou des neurones d'association.

Les cornes dorsales, essentiellement réceptrices, contiennent des cellules étoilées ou fusiformes de taille moyenne (50 à 80 microns). Leurs dendrites forment des synapses avec les axones des cellules du ganglion rachidien. Elles assurent le relais entre les ganglions rachidiens et tous les étages du système nerveux central.

Les cellules des cornes latérales sont petites. Leurs axones myélinisés sont en relation avec les cellules ganglionnaires de la chaîne prévertébrale autonome, via la racine ventrale et les rameaux communicants blancs.

On retrouve également dans la substance grise de petits neurones intercalaires qui assurent le relais entre les neurones cités plus haut ; ils sont responsables de la diffusion de l'influx nerveux. Ils sont surtout localisés dans la commissure grise qui réunit les parties droite et gauche de la moelle, au niveau des cornes latérales. Certains, les cellules cordonales, connectent les différents étages de la moelle du même côté ou du côté opposé, grâce à leurs longs axones myélinisés et ramifiés, totalement inclus dans la substance grise : ils associent les neurones voisins.

Sur une coupe transversale de moelle épinière, les neurones sont plus ou moins regroupés en couches cellulaires, numérotées de 1 à 10.

Les motoneurones alpha, gamma forment des colonnes motrices importantes au niveau des renflements cervical et lombaire.

4.2.3. LE CERVELET (FIG. 24, 25, 26, 27, 28)

La substance griseuse, le cortex cérébelleux, qui recouvre toute la surface du cervelet, et des noyaux profonds. La surface du cervelet présente de nombreux sillons qui délimitent des lamelles cérébelleuses. Une lamelle cérébelleuse est orientée perpendiculairement à l'axe du corps de l'individu.

Le cortex cérébelleux est formé de 3 couches cellulaires qui sont, de l'extérieur vers l'intérieur :

- La couche moléculaire ;
- La couche des cellules de Purkinje ;
- La couche des grains. Sous cette couche des grains se trouve la substance blanche.

Le schéma tridimensionnel du cortex cérébelleux indique le plan axial du névraxe (du corps) et l'axe de la lamelle cérébelleuse, perpendiculaire à ce plan.

Le cortex cérébelleux comporte 5 types de neurones différents, 2 types de fibres afférentes et un type de fibres efférentes.

Les neurones :

a- Les cellules de Purkinje : leurs corps cellulaires volumineux (50 microns) sont disposés en une seule couche au niveau d'une lamelle. Les corps sont à peu près équidistants, dans toutes les directions.

L'arbre dendritique de chaque cellule est caractéristique, et disposé en un seul plan parallèle à l'axe du névraxe. Il y a donc une disposition en plans parallèles des arbres dendritiques. Les dendrites portent de petites ramifications pourvues d'épines correspondant à des synapses.

Leurs axones rejoignent les noyaux gris cérébelleux (situés « au niveau » de la substance blanche du cervelet) et vestibulaires. Ils émettent des collatérales axonales qui vont se projeter sur d'autres neurones situés à proximité.

b- Les grains du cervelet : ce sont de toutes petites cellules d'environ 5 à 10 microns, dont les dendrites très courts se terminent en tridents. Ces dendrites participent à la formation du glomérule cérébelleux.

Les axones remontent à travers la couche moléculaire jusqu'à la partie la plus superficielle, et se bifurquent en deux branches parallèles à l'axe de la lamelle (fibres parallèles). Les deux branches contactent les épines des dendrites des cellules de Purkinje.

c- Les cellules étoilées superficielles : leurs dendrites s'épanouissent dans un plan parallèle au plan dendritique des cellules de Purkinje. Leurs axones contactent les dendrites de plusieurs cellules de Purkinje.

d- Les cellules à corbeille ont un corps cellulaire situé au niveau de celui des cellules de Purkinje. Leurs dendrites sont dans un plan parallèle au plan dendritique des cellules de Purkinje ; leur axone qui parcourt un plan perpendiculaire à l'axe de la lamelle se ramifie abondamment, en émettant des collatérales de chaque côté.

Chaque collatérale contacte une cellule de Purkinje, en formant autour de son corps un panier péricellulaire comportant de nombreuses synapses.

e- Les cellules de Golgi II sont de grosses cellules situées dans la couche des grains. Leur axone participe à la formation du glomérule cérébelleux ; leurs dendrites disposées dans tous les plans de l'espace s'épanouissent dans le territoire des dendrites de 3 cellules de Purkinje et participent aussi à la formation du glomérule cérébelleux.

Les afférences au cortex cérébelleux

a- Les fibres moussues : ce sont des axones provenant de la moelle, des noyaux du pont et des noyaux vestibulaires, qui se terminent dans la couche des grains. Chaque terminaison est entourée par des dendrites des grains, et des dendrites de Golgi II.

Tout autour de ces terminaisons dendritiques qui entourent la fibre moussue, viennent se projeter des boutons axonaux de cellules de Golgi II. Enfin l'ensemble est entouré par des cellules gliales. C'est cet ensemble complexe qui est appelé le glomérule cérébelleux.

b- Les fibres grimpantes : elles proviennent de l'olive bulbaire contralatérale. Elles contactent en passant les dendrites des cellules de Purkinje dans la couche moléculaire, mais également les corps des cellules à corbeille et des cellules étoilées.

Les efférences au cortex cérébelleux :

Ce sont les axones des cellules de Purkinje uniquement.

Régulation du cortex cérébelleux :

L'activité du cortex cérébelleux est réglée par des éléments inhibiteurs et des éléments activateurs.

- Éléments inhibiteurs :
 - Les cellules de Purkinje (elles inhibent les noyaux qu'elles innervent).
 - Cellules à corbeille étoilées profondes
 - Cellules étoilées superficielles
 - Cellules de Golgi II
- Éléments activateurs :
 - Grains du cervelet
 - Fibres moussues
 - Fibres grimpantes

Le fonctionnement du cervelet s'effectue par le jeu de l'activation et de l'inhibition. Par exemple, l'activité d'une cellule à corbeille inhibe la cellule de Purkinje. Cette cellule est elle-même inhibitrice, donc la cellule à corbeille empêchera la cellule de Purkinje d'être trop inhibitrice. Le grain du cervelet est activateur ; il contacte la cellule de Purkinje qu'il oblige à être plus inhibitrice ; il y aura par exemple équilibre entre l'activation de la cellule de Purkinje par le grain et son inhibition par la cellule à corbeille.

La cellule de Golgi II permet un rétrocontrôle négatif du relais fibre moussue-grain.

4.2.4. LE CERVEAU (FIG. 29, 30, 31, 32, 33)

La substance grise comprend les noyaux profonds (où les neurones sont généralement groupés) et le cortex cérébral (au niveau des hémisphères cérébraux) dont la surface, grâce aux très nombreux replis, représente près de 2,2 m². Il contient environ 10 milliards de neurones. Les plis profonds délimitent les lobes frontal, occipital, pariétal et temporal. D'autres, moins profonds, divisent les lobes en circonvolutions.

Dans le cortex, les neurones sont organisés en couches superposées. La cellule pyramidale est le neurone caractéristique du cortex cérébral, le seul neurone effecteur dont l'axone quitte la substance grise. Des fibres myélinisées groupées en plexus parcourent la substance grise perpendiculairement à la surface du cortex, d'autres parallèlement, ménageant ainsi des « colonnes » de neurones qui assurent une fonction bien définie. Les synapses sont, elles aussi, organisées en couches superposées et sont de plus en plus nombreuses de la substance blanche vers la surface. L'agencement de ces éléments diffère selon les régions ou les aires corticales.

On distingue deux types d'organisation des neurones ou cortex (on parle de « cytoarchitectonie ») en fonction de leur complexité :

- **L'archipallium** : il est comparable au cerveau des vertébrés inférieurs et ne comprend que deux couches (une couche extérieure granulaire réceptrice et associative et une couche interne de cellules pyramidales, effectrices au niveau de l'hippocampe) ou trois couches dont une seule constituée de cellules pyramidales au niveau du rhinencéphale ou cortex olfactif.
Chez l'homme ce type de cortex est peu abondant, localisé dans des zones profondes où ont été découvertes des cellules souches capables de se différencier en neurones.
- **le néopallium** : c'est celui qui constitue la majorité de la surface des hémisphères cérébraux. Il est plus complexe, composé de 6 couches cellulaires séparées par des fibres myélinisées parallèles à la surface (Figure 32).

Les six couches se disposent schématiquement de la façon suivante : (formant l'isocortex homotypique)

Couche 1 : couche moléculaire (la plus externe), contient peu de neurones (cellules de Cajal : neurones fusiformes à neurites parallèles à la surface). Ces neurones associent les axones des grains de la couche 2 et les dendrites des cellules pyramidales effectrices des couches 3 et 5. C'est dans cette couche que se trouve la densité de synapses la plus importante.

Couche 2 : couche des grains externes : contient des petits neurones récepteurs aux dendrites courts et ramifiés. Leurs axones sont en relation avec les neurones de la couche 1 ou directement avec les cellules effectrices. Cette couche reçoit les informations des couches effectrices des zones corticales du même hémisphère.

Couche 3 : couche des cellules pyramidales de petite et moyenne tailles. Elle est effectrice. Elle envoie des informations aux couches 2 et 5 d'autres zones corticales du même hémisphère.

Couche 4 : couche granulaire interne. Elle contient des cellules réceptrices assurant la transmission des informations venant des zones sous-corticales vers les couches effectrices 3 et 5.

Couche 5 : couche des grandes cellules pyramidales et des cellules associatives. Les axones des cellules pyramidales conduisent les influx moteurs vers les étages sous-corticaux. C'est donc la couche la plus développée des aires corticales motrices.

Couche 6 : couche des cellules polymorphes.

L'importance des couches varie selon les zones. Dans les aires motrices, les cellules pyramidales sont très nombreuses, les couches 3 et 5 épaisses alors que les couches 2 et 4 sont réduites. Les cortex des régions sensorielles ont leurs couches granulaires très développées et leurs couches pyramidales réduites. Du point de vue myéloarchitectonique, le cortex comprend quatre bandes myélinisées parallèles à la surface. La 1^{re} est dans la couche moléculaire (plexus d'Exner) ; la 2^e est entre les couches 2 et 3 (strie de Bechterew), la 3^e occupe la couche 4 (strie de Baillarger interne).

Les fibres myélinisées perpendiculaires à la surface du cortex sont (figure 33) :

- les fibres afférentes au cortex et qui vont se terminer dans les plexus à différents niveaux du cortex en perdant leur myéline, juste avant d'établir des contacts synaptiques.
- Les fibres efférentes qui quittent le cortex. Ces fibres efférentes sont les axones des cellules pyramidales, qui vont rejoindre des structures plus ou moins éloignées du cortex.
- Les fibres myélinisées perpendiculaires à la surface délimitent des colonnes cellulaires bien visibles dans le cortex profond, et qui, dans certains cortex sensoriels, correspondent à des unités fonctionnelles.

L'analyse quantitative ultrastructurale du cortex cérébral a montré que les synapses ont beaucoup plus nombreuses dans les couches superficielles du cortex que dans les couches profondes.

La substance blanche du cerveau est sous-corticale. Elle est formée de fibres myélinisées, le trajet de leurs faisceaux dépend des relations qu'elles établissent entre les différentes régions du cerveau.

Les fibres associatives relient 2 zones corticales d'un même hémisphère.

Les fibres commissurales relient les zones corticales des deux hémisphères.

Les fibres de projection afférentes ou efférentes relient le cortex avec des centres sous-corticaux. Les fibres pyramidales (axones des cellules pyramidales de la couche 5) sont des exemples de fibres de projection ; leur faisceau quitte les zones motrices, rejoint le tronc cérébral et se termine dans la moelle épinière.

Le cortex cérébral reçoit sa vascularisation artérielle de la pie-mère, où repart sa vascularisation veineuse.

La vascularisation est de type anastomotique pour la circulation artérielle.

Les vaisseaux pénètrent dans le cortex plus ou moins profondément et se capillarisent. La capillarisation forme des strates qui ne correspondent pas à toutes les strates cellulaires.

Les capillaires ont un endothélium continu reposant sur une lame basale épaisse, avec des jonctions très étanches entre les cellules endothéliales (barrière hémato-encéphalique).

Certains vaisseaux atteignent la substance blanche, elle-même peu irriguée.

Les corrélations morpho-fonctionnelles sont difficiles à établir. En effet, on ne connaît pas toujours l'activité de chaque constituant du cortex cérébral. On sait que les cellules pyramidales sont activatrices. De nombreuses cellules telles que les cellules étoilées, les cellules à corbeille, les cellules de Golgi sont des cellules qui utilisent un neurotransmetteur, le GABA, substance inhibitrice. On sait que les cellules bipolaires sont peptidergiques et activatrices. Le schéma fonctionnel du cortex cérébral actuellement proposé est loin d'être exhaustif.

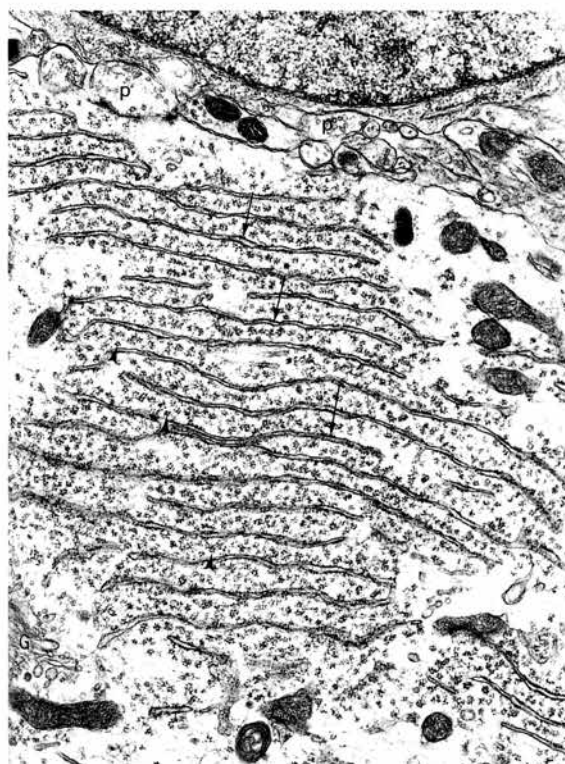
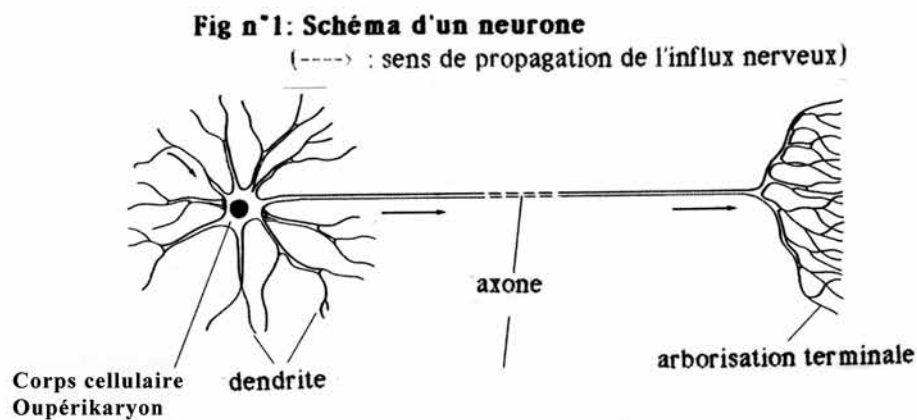


Fig n°2: Corps de Nissl au microscope électronique

Fig n°3: Schéma d'un neurone et de ses contacts avec d'autres cellules nerveuses

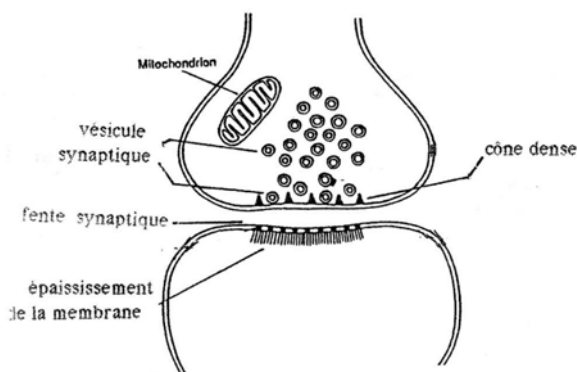
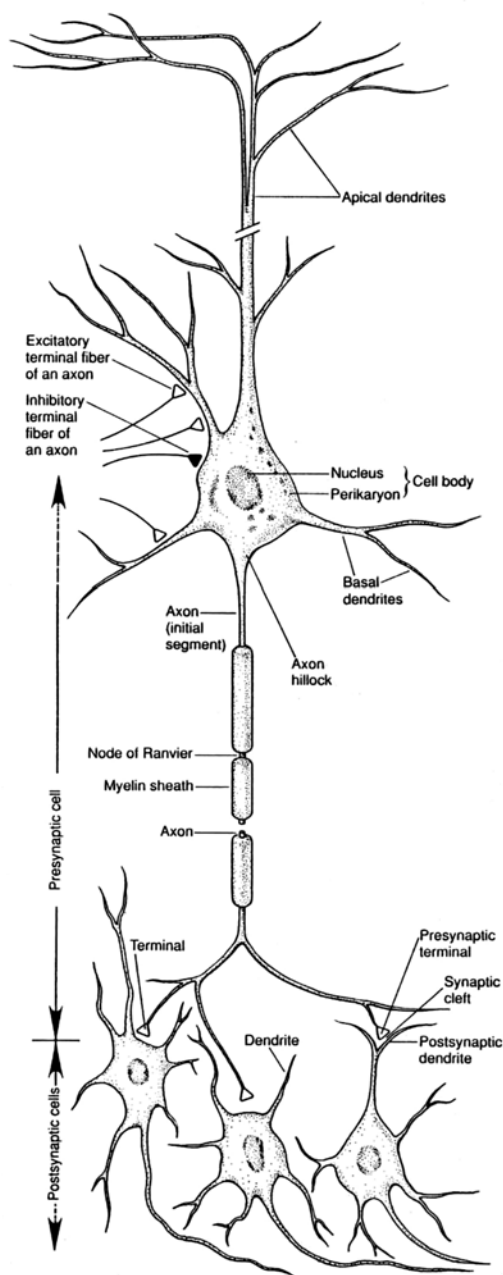


Fig n°4: Schéma d'une synapse chimique

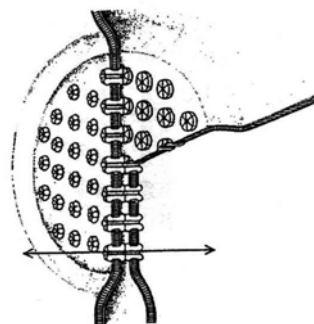


Fig n° 5: Schéma d'une synapse électrique
 ← → : passage des ions

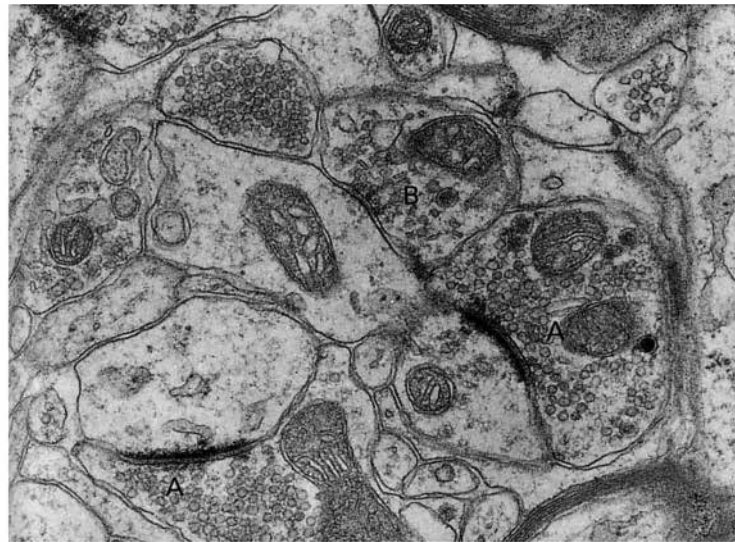


Fig n°6: Synapses chimiques en microscopie électronique

Fig n°7: Schéma des différents types de neurones

Neurones unipolaires		
Neurones bipolaires	Neurones bipolaires vrais	
	Neurones pseudo-unipolaires	
Neurones multipolaires		

Fig n° 8: Cellules gliales

A: astrocyte protoplasmique

B: astrocyte fibreux

C: microglie

D: oligodendrocyte

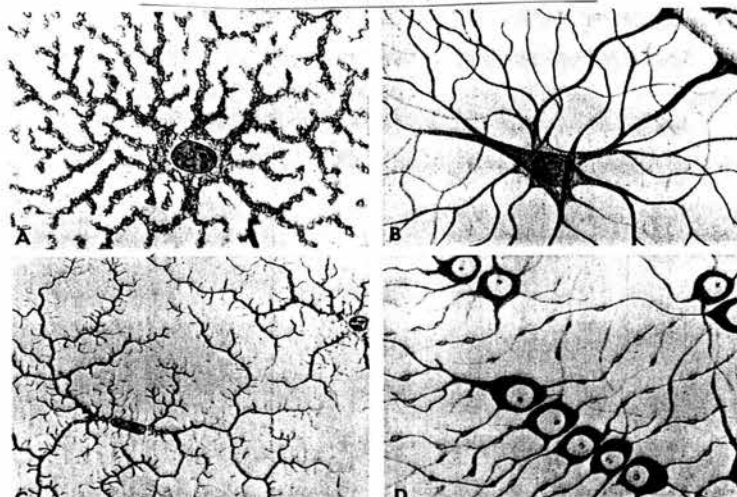


Fig. 8 bis: 1: Neurites non myélinisés englobés dans des invaginations d'une cellule de Schwann
2: Gaine de myéline (m)

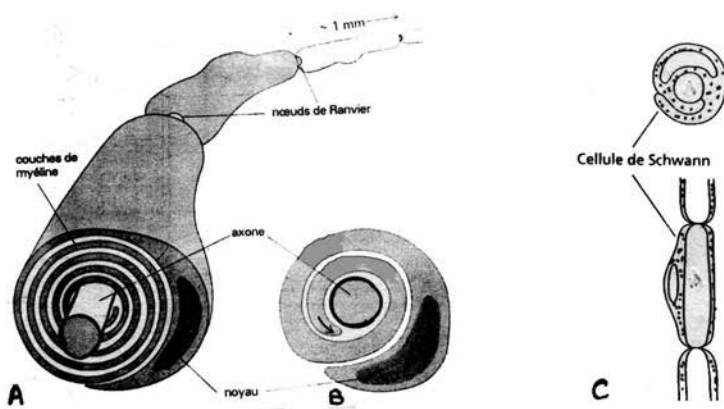
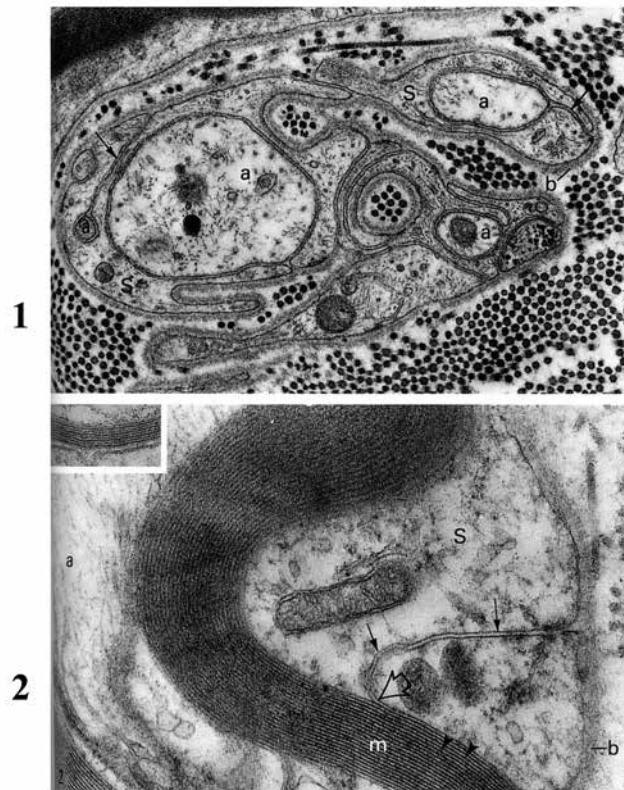
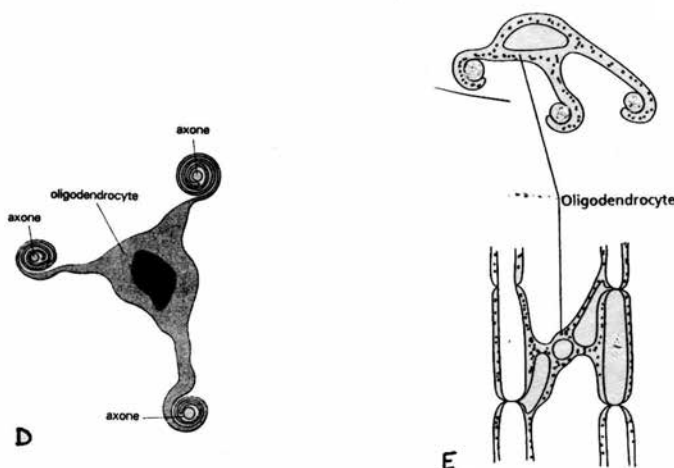


Fig n° 9: Formation de la gaine de myéline
A,B,C: dans le système nerveux périphérique
D,E : dans le système nerveux central



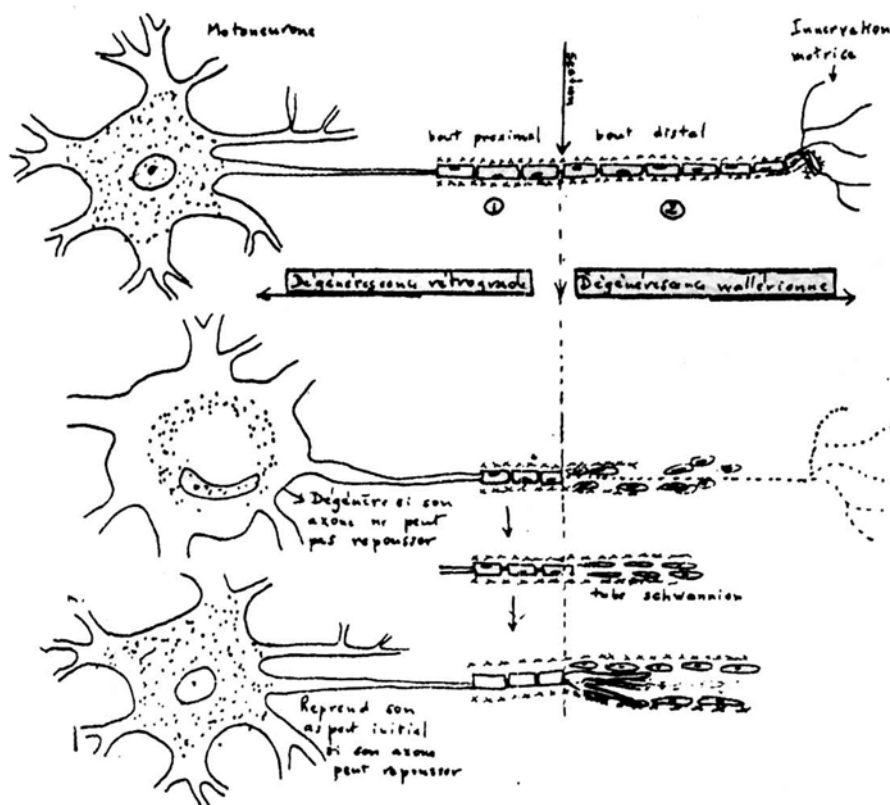


Fig n° 10: Dégénérescences et régénération des fibres nerveuses

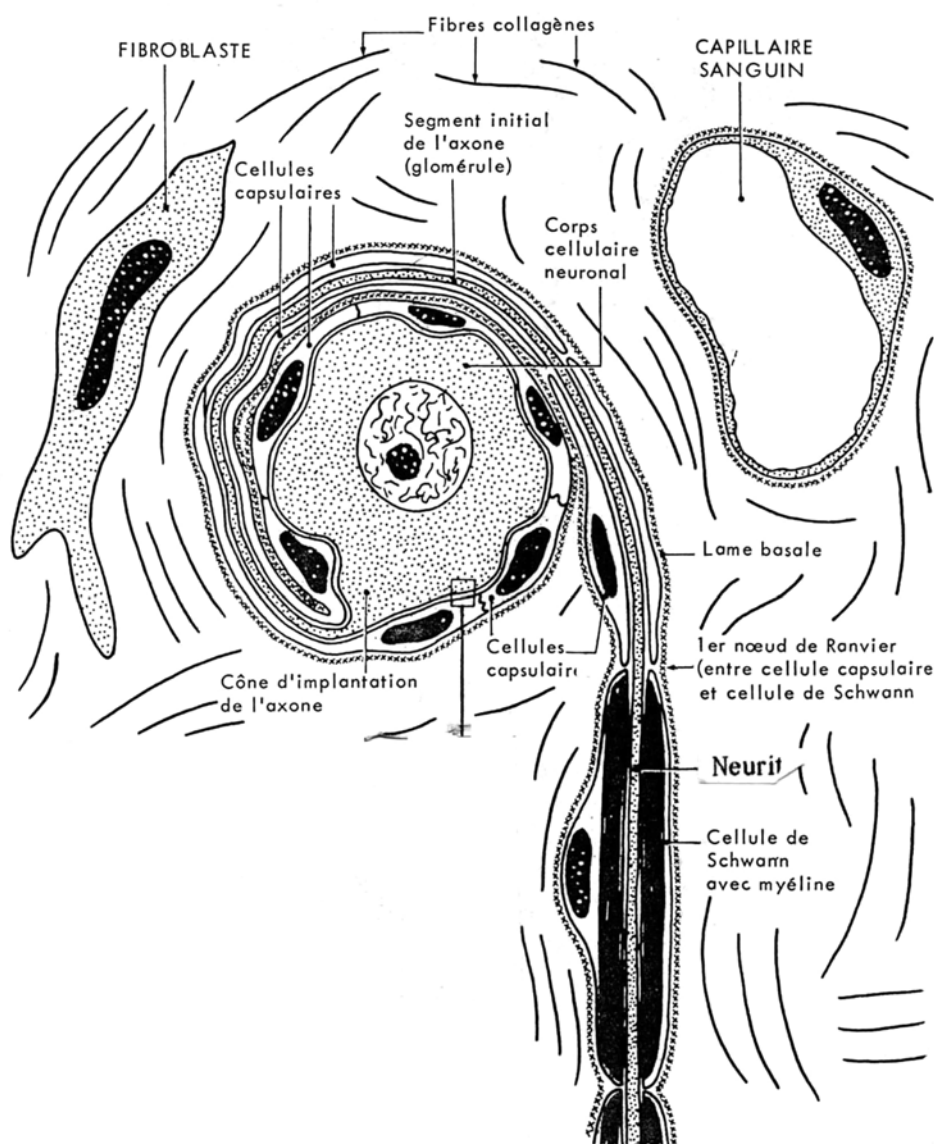


Fig 10 bis: Représentation schématique de l'ultrastructure des éléments constitutifs d'un ganglion rachidien

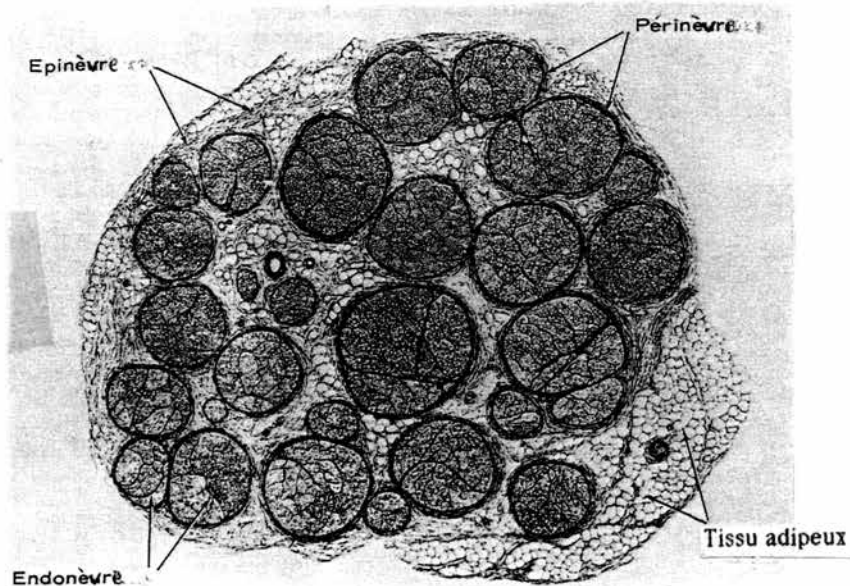


Fig. 11 : Coupe transversale d'un nerf périphérique

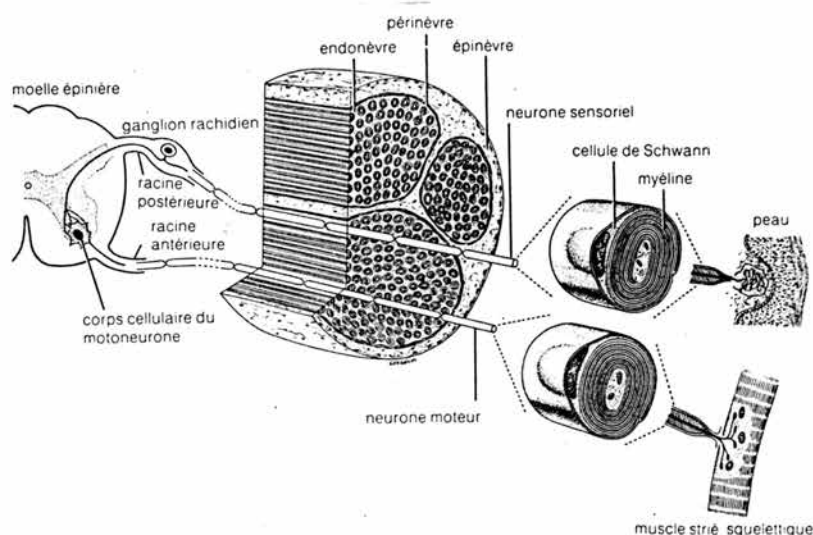


Fig. 12 Schéma représentant la structure d'un nerf et de l'arc réflexe élémentaire. Dans cet exemple le stimulus sensoriel a pour origine la peau, et la fibre motrice innervé un muscle strié squelettique. (D'après Ham AW: *Histology*, 6th ed. Lippincott, 1969).

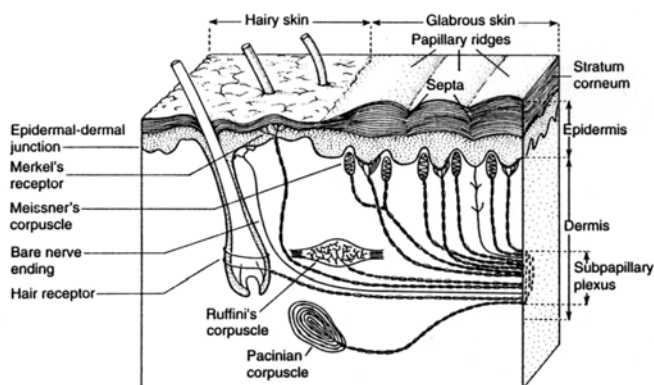


Fig. 13 : Différents types de terminaisons nerveuses sensibles au niveau des peaux minces et épaisses.

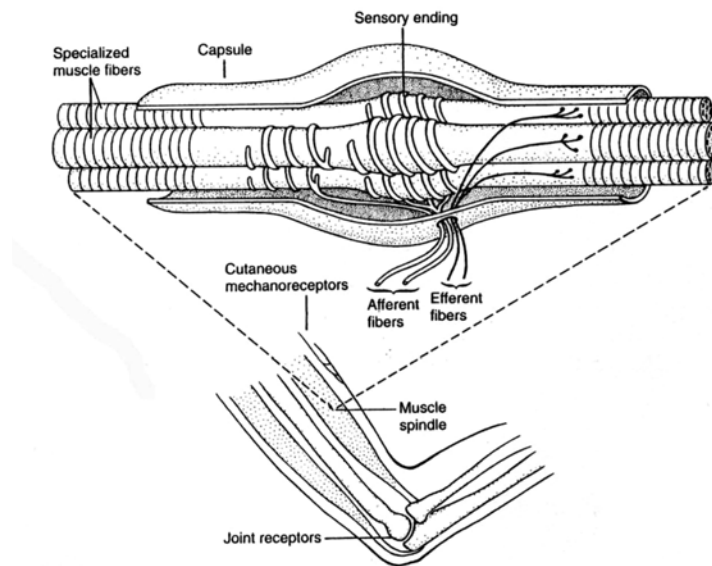


Fig. 14 : Fuseau neuro-musculaire

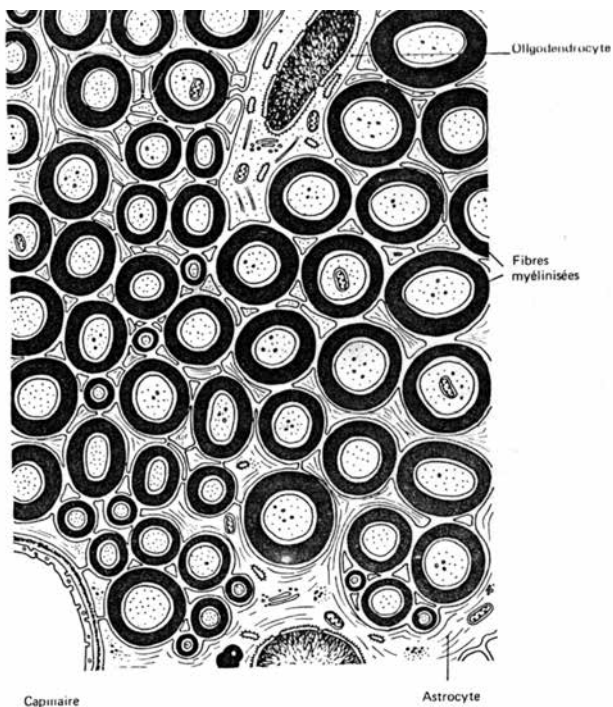


Fig. 15 – La substance blanche : schéma de l'aspect en microscopie électronique.

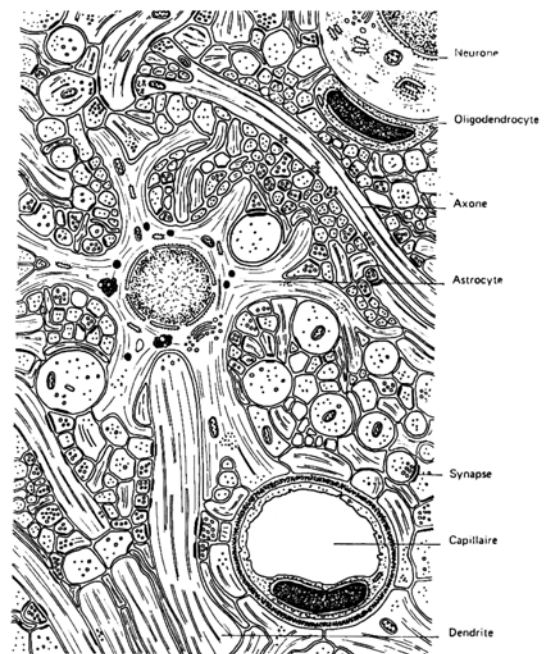


Fig. 16 – La substance grise : schéma de l'aspect en microscopie électronique.

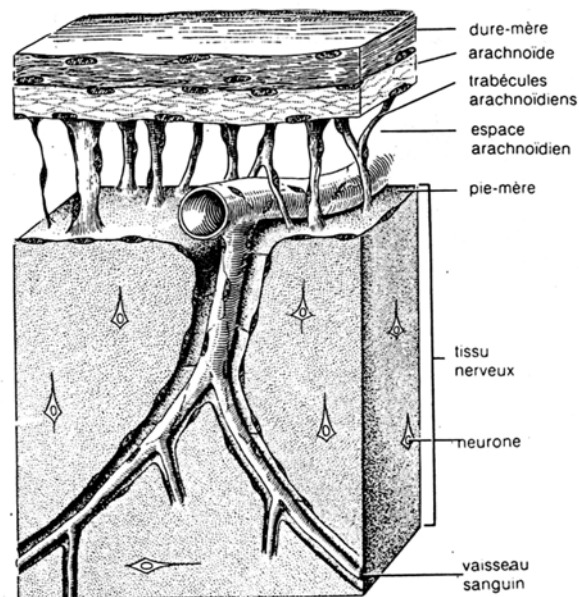


Fig. 17 Schéma des méninges. Les vaisseaux sanguins tout d'abord localisés dans l'espace arachnoïdien, pénètrent dans le tissu nerveux entouré de la pie-mère.

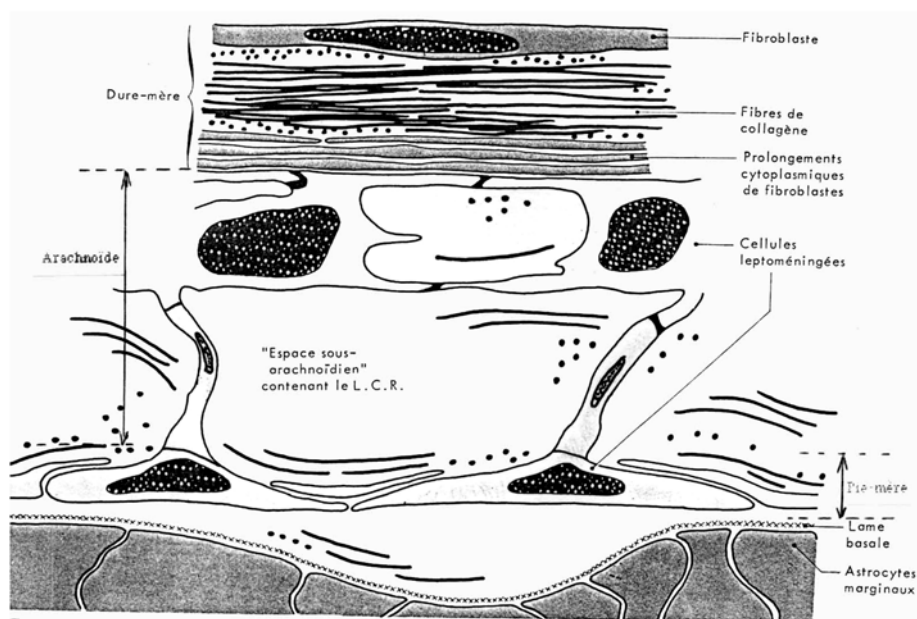
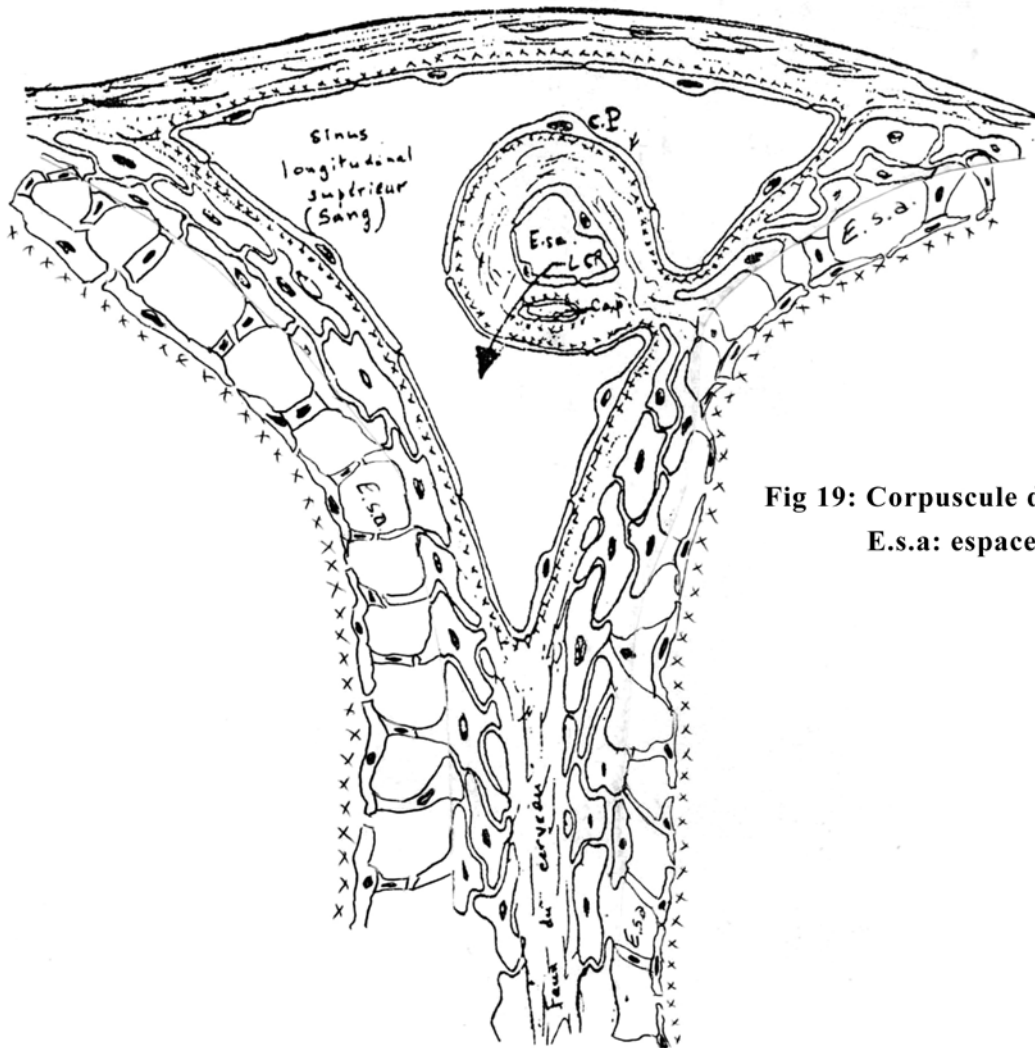
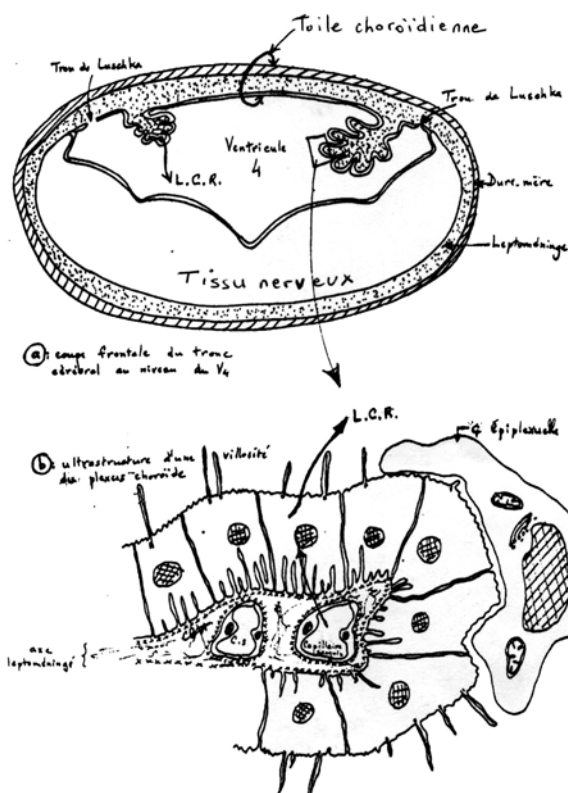


Fig. 18 Schéma de l'ultrastructure des méninges.



**Fig 19: Corpuscule de Paccioni (c.p),
E.s.a: espace sous arachnoïdien**



**Fig. 20 : a= Toile choroïdienne du 4ème ventricule et plexus
choroïdes
b= Histologie d'une villosité choroïdienne**

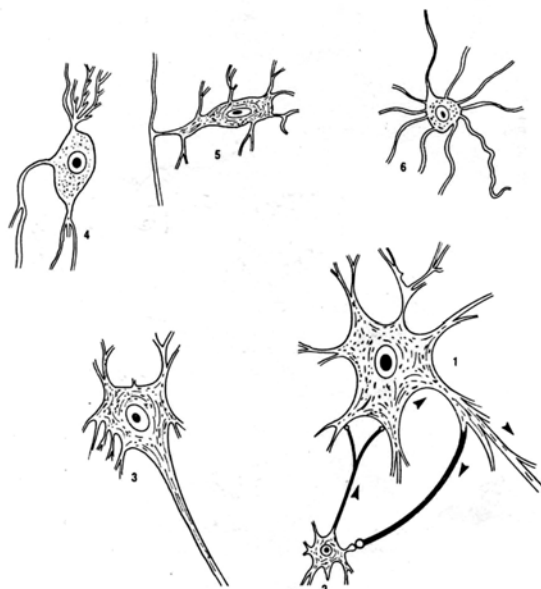


Fig. 21

Aspects morphologiques des principaux neurones de la moelle épinière. Corne antérieure de la moelle : 1) motoneurone alpha; 2) cellule de Renshaw; 3) motoneurone gamma. Corne latérale de la moelle : 4) cellule végétative préganglionnaire. Cornes antérieure et postérieure de la moelle : 5) cellule funiculaire; 6) cellule de Golgi type II.

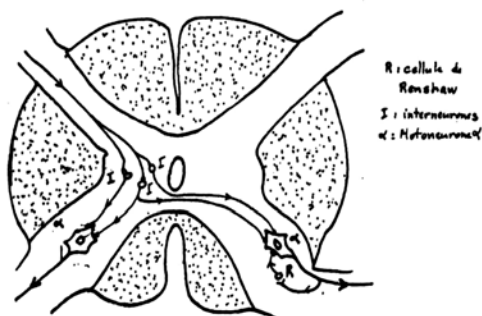


Fig. 22 : Moelle épinière: interneurones, ou cellules d'association intrasegmentaires ou cellules de Golgi II.

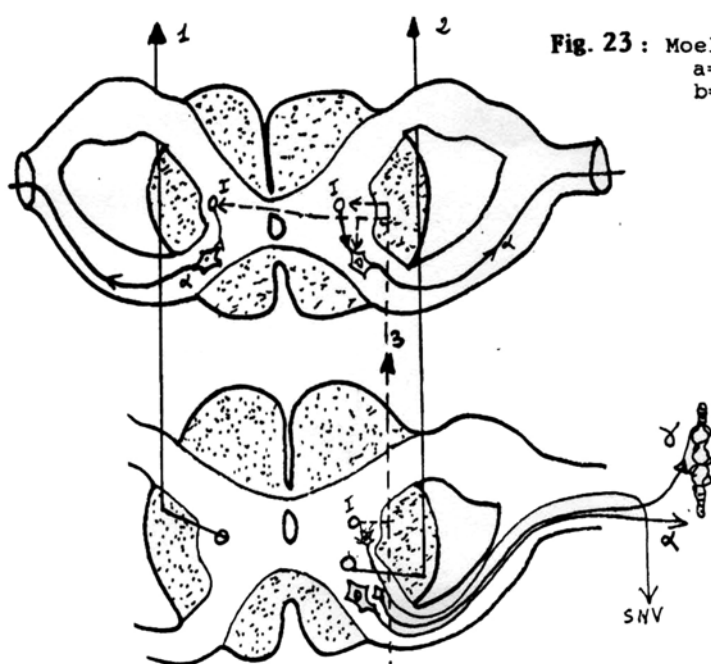


Fig. 23 : Moelle épinière

a= cellules radiculaires (à droite du schéma)
b= cellules cordonnales (à gauche)

1: voies spino-cérébelleuses
2: voies spino-thalamiques
3: voies d'association intersegmentaires ipsi- et contro-latérales
I: interneurones
SNV: système nerveux végétatif

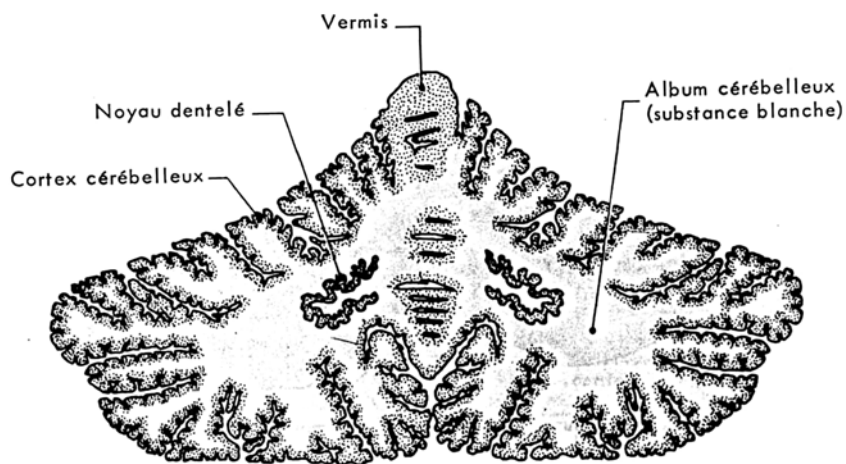


Fig. 24 Schéma d'une coupe vertico-frontale du cervelet.

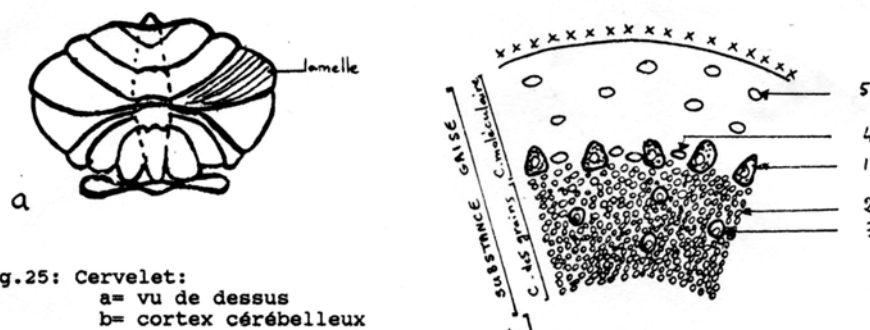


Fig. 25: Cervelet:
a= vu de dessus
b= cortex cérébelleux

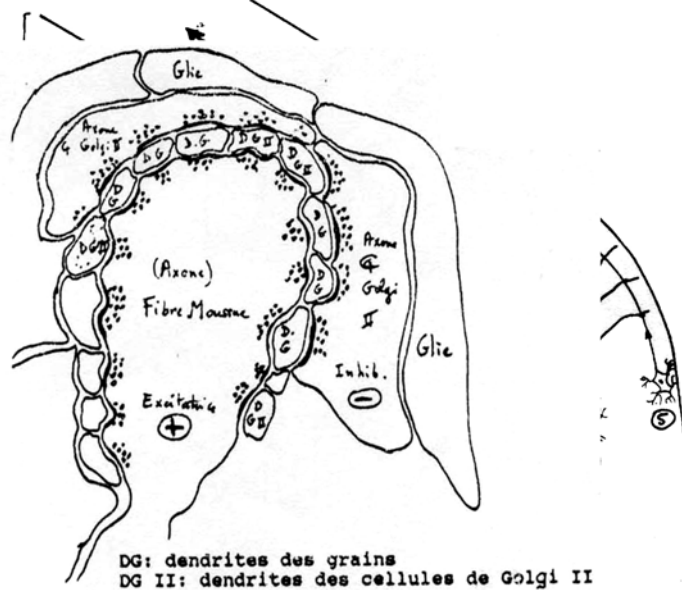


Fig. 27: Glomérule cérébelleux

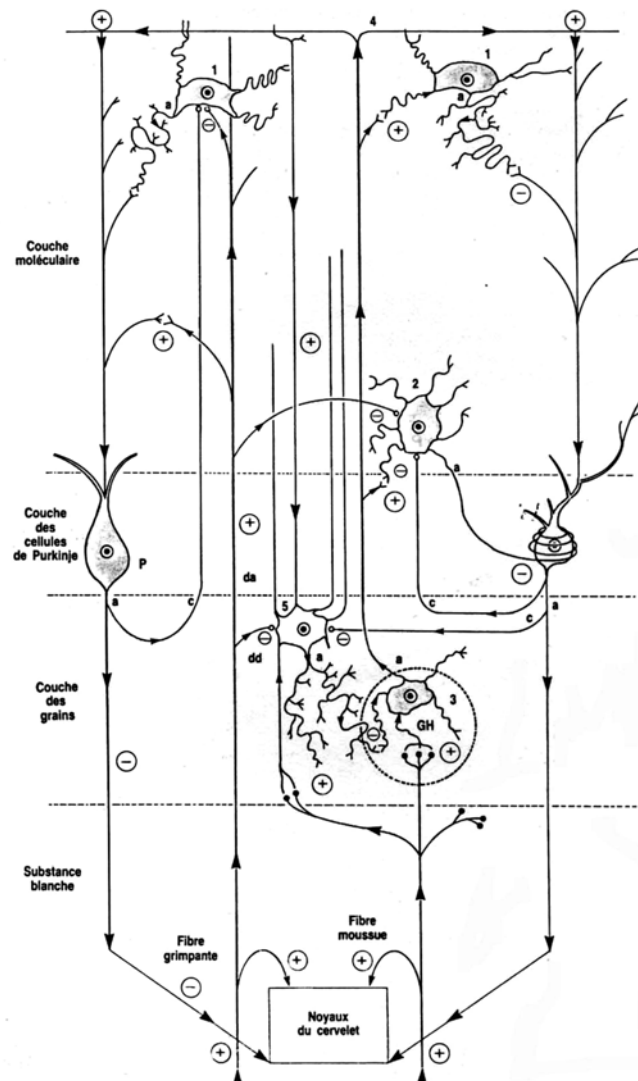


Fig. 28

Schéma représentant les interactions des neurones cérébelleux. Couche moléculaire avec les cellules étoilées superficielles (1) et les cellules en panier (2); couche des cellules de Purkinje (P); couche des grains : cellules des grains (3) dont les axones constituent les fibres parallèles (4) et dont les dendrites font synapse avec les terminaisons des fibres moussues dans le glomérule de Held (GH); cellules de Golgi type II (5). Les flèches indiquent le sens dans lequel circule l'influx nerveux qui peut être soit inhibiteur soit excitateur. a : axone; da : dendrites ascendants; dd : dendrites descendants; c : collatérales de l'axone des cellules de Purkinje.

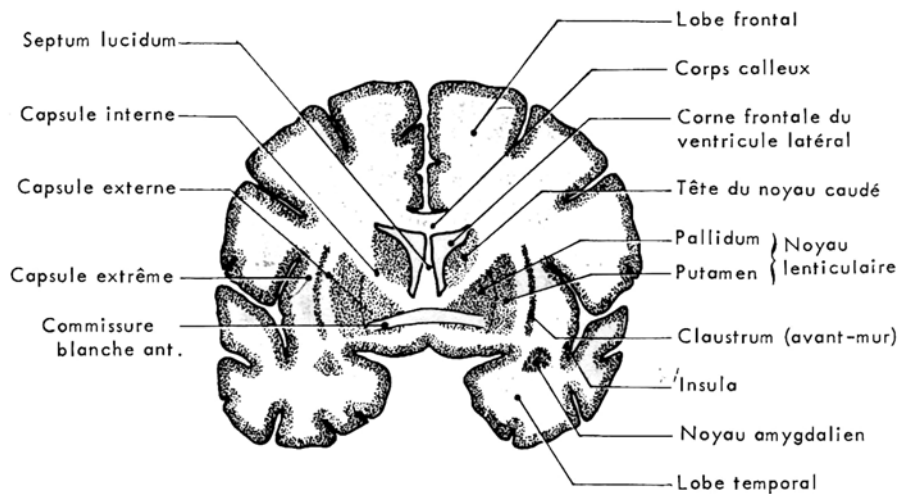


Fig. 29.. Schéma d'une coupe vertico-frontale des hémisphères cérébraux au niveau de la commissure blanche antérieure et des pôles temporaux.

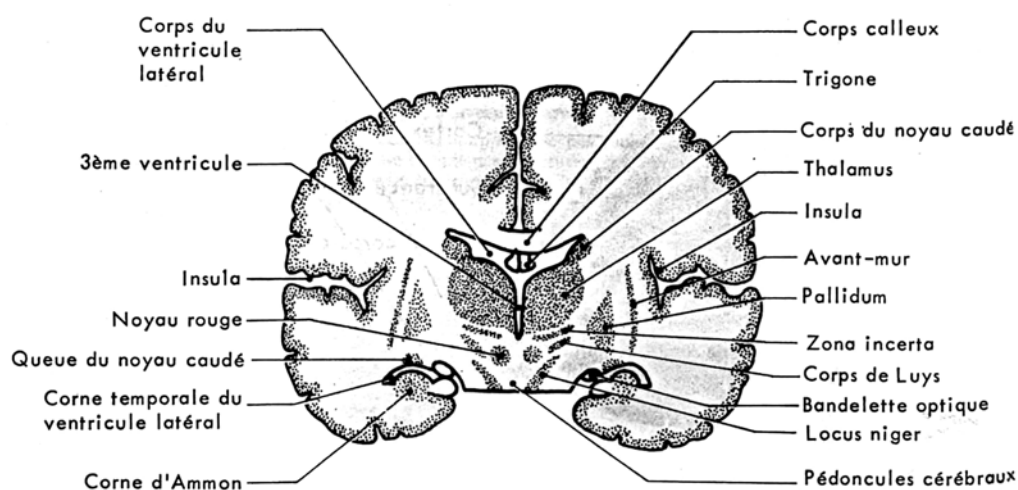


Fig. 30. Schéma d'une coupe vertico-frontale des hémisphères cérébraux au niveau des thalamus.

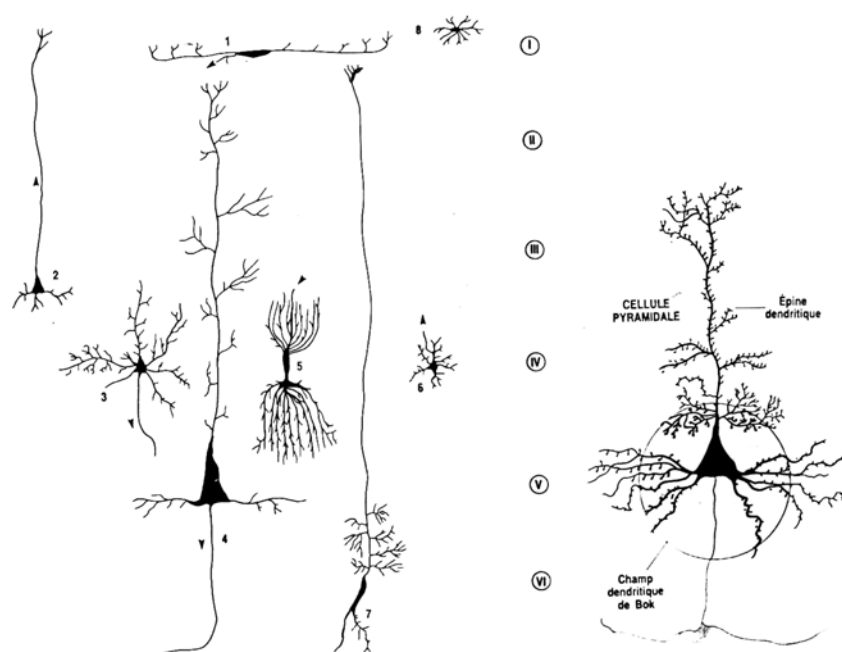
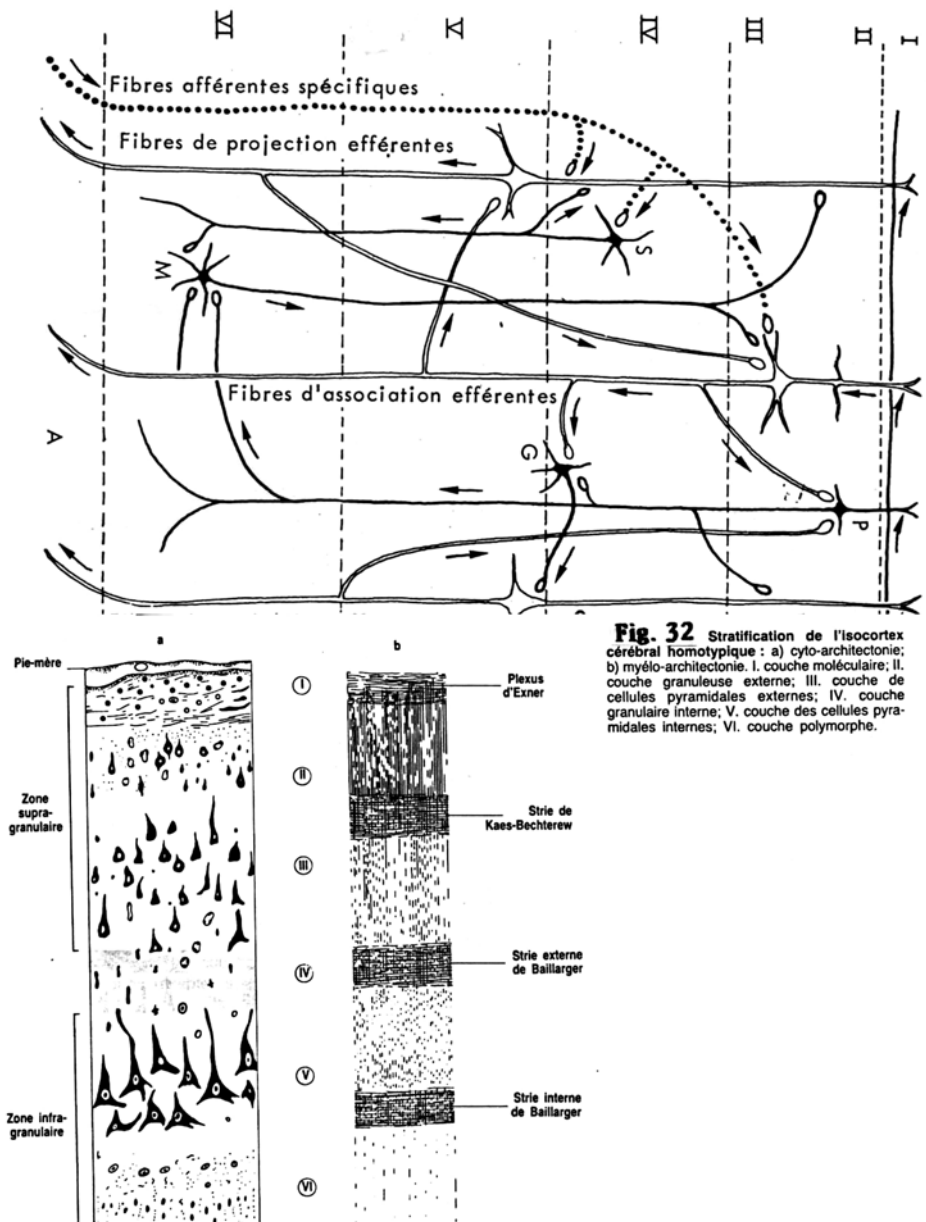


Fig. 31 Types cellulaires du cortex cérébral. Les chiffres romains indiquent les 6 couches corticales. 1) cellule horizontale de Cajal-Retzius; 2) cellule de Martinotti; 3) cellule pyramidale étoilée; 4) grande cellule pyramidale; 5) cellule à double bouquet; 6) cellule étoilée; 7) cellule fusiforme; 8) cellule névroglique. Les points de flèches indiquent le sens dans lequel circule l'influx nerveux. À la base de la cellule pyramidale, les dendrites latéraux, constituant des prolongements ramifiés, ainsi que la portion initiale du dendrite apical forment le champ dendritique local de Bok.

Fig. 33 . Diagramme de quelques-uns des circuits intracorticaux (redessiné d'après TRUAX et CARPENTER, 1969).



EMBRYOLOGIE DU SYSTÈME NERVEUX

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. Décrire les différentes étapes aboutissant à la mise en place du tube neural en indiquant les phénomènes d'induction impliqués.
2. Indiquer les étapes de la formation des crêtes neurales et le devenir des crêtes neurales.
3. Indiquer les étapes successives du développement du tube neural se rapportant à la multiplication, migration, croissance et différenciation des cellules nerveuses ainsi qu'à la stabilisation des synapses.
4. Décrire le développement normal de la partie caudale du tube neural.
5. Décrire les malformations de la partie caudale du tube neural en précisant les anomalies de développement à l'origine de ces malformations.
6. Décrire le développement normale de la partie céphalique du tube neural.
7. Décrire les malformations de la partie céphalique du tube neural en précisant les anomalies du développement à l'origine de ces malformations.

PLAN DU COURS

1- INTRODUCTION – NEURULATION

2- LES CRÊTES NEURALES

3- CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LE DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME NERVEUX CENTRAL

4- DÉVELOPPEMENT DE LA PARTIE CAUDALE : LA MOELLE ÉPINIÈRE

4.1. Développement normal

- 4.1.1. Moelle épinière et somites
- 4.1.2. Histogenèse de la moelle épinière
- 4.1.3. Longueur de la moelle par rapport au rachis et à la dure-mère

4.2. Malformations de la partie caudale

- 4.2.1. Rachischisis
- 4.2.2. Spina bifida aperta
- 4.2.3. Malformation des vertèbres avec un tube neural fermé

5- DÉVELOPPEMENT DE LA PARTIE CÉPHALIQUE

5.1 GÉNÉRALITÉS

5.2 DEVENIR DES DIFFÉRENTES VÉSICULES

- 5.2.1. Le myélencéphale
- 5.2.2. Le métencéphale
- 5.2.3. Le mésencéphale
- 5.2.4. Le diencéphale
- 5.2.5. Le télencéphale

5.3. Mise en place des commissures

5.4. Myélinisation

5.5. Malformations de l'encéphale

- 5.5.1. Troubles de la fermeture de la gouttière neurale au niveau cranial
- 5.5.2. Les défauts de la fermeture du crâne osseux
- 5.5.3. Les anomalies de la ligne médiane
- 5.5.4. Hydrocéphalie congénitale
- 5.5.5. Malformations du cervelet
- 5.5.6. Troubles de l'histogenèse

6. FORMATION DES MÉNINGES

INTRODUCTION – NEURULATION (fig 1 et 2)

Le système nerveux comprenant la moelle épinière, le cerveau, le cervelet, les ganglions nerveux et les nerfs périphériques, dérive embryologiquement de l'ectoderme. Le système nerveux commence à se différencier **vers le 18^e jour** du développement embryonnaire. L'ectoderme situé en avant du nœud de Hensen, s'épaissit et devient neurectoderme sous l'induction des structures sous-jacentes (chorde et mésoderme) et forme la **plaque neurale** qui a la forme d'une raquette dont la partie large est craniale et la partie effilée est caudale.

Au 19^e jour, la plaque s'invagine, ses bords se soulèvent, et forment ainsi une **gouttière neurale**.

Au début de la 4^e semaine, les bords de la gouttière neurale continuent à se surélever, se rapprochent l'un de l'autre et finissent par fusionner constituant ainsi le **tube neural**. Peu avant la fermeture du tube neural, se détache de chaque côté un cordon longitudinal issu de la zone de jonction gouttière neurale ectoderme constituant les **crêtes neurales**.

* La fermeture du tube neural commence dans la région moyenne de l'embryon (future région cervicale) puis s'étend progressivement vers les 2 extrémités.

Le tube neural est ouvert à ses 2 extrémités par 2 orifices :

- **neuropore antérieur** qui se ferme vers le 26^e jour
- **neuropore postérieur** qui se ferme vers le 28^e jour

L'ensemble des différentes étapes de la mise en place du tube neural et des crêtes neurales, sous l'induction des structures sous-jacentes, correspond à la **neurulation**.

Le développement du tube neural induit à son tour la formation de la voûte crânienne au niveau cranial et la formation des arcs postérieurs des vertèbres au niveau caudal.

2- LES CRÊTES NEURALES (fig 3)

Les cellules des crêtes neurales s'individualisent à la jonction du neuro-épithélium et de l'ectoderme, dès le stade gouttière neurale. Elles perdent le caractère de cohésion propre aux épithéliums et quittent le tube neural au début de la 4^e semaine et sont à l'origine d'un ensemble très hétérogène d'organes, de tissus et de cellules libres.

- **Les crêtes neurales ont une organisation régionale** : Les cellules des crêtes neurales migrent d'une région précise du tube neural vers une destination déterminée, les crêtes neurales d'origine céphalique quittent les vésicules cérébrales et participent à la morphogenèse craniofaciale, cervicale et cardiaque où elles acquièrent les caractères de cellules mésenchymateuses. Dans la région distale, la migration des crêtes neurales suit la métamérisation des somites, en regard de chaque somite, les massifs de crêtes neurales constituent les ganglions spinaux du système nerveux périphérique.
- **Les crêtes neurales ont un grand pouvoir de migration** : les cellules migrent en direction ventrale dans le mésenchyme intraembryonnaire.
- **Les crêtes neurales ont une diversité phénotypique** : les cellules des crêtes neurales peuvent rester isolées dans un tissu colonisé (exemple : les mélanoblastes), devenir cohésives en une structure individualisée (exemple : le ganglion spinal...), ou constituer un tissu lâche de type conjonctif (exemple : l'ectomésenchyme du massif craniofacial).

Diversité phénotypique des cellules de crêtes neurales

Neurones	Ganglions sensoriels de certains nerfs crâniens Ganglions spinaux Ganglions des systèmes nerveux autonomes Sympathique et parasympathique
Cellules gliales	Cellules satellites Cellules de Schwann
Cellules endocrines et certaines cellules du système endocrinien diffus	Cellules chromaffines de la médullosurrénale Cellules parafolliculaires : cellule à calcitonine de la thyroïde Cellules de type I/II du corps carotidien Paraganglions adrénergiques Cellules endocrines au niveau des glandes de la paroi gastrique, intestinale,...
Cellules pigmentaires	Mélanoblastes, cellules de pigmentation de l'iris
Méninges	Cellules leptomeningées (Arachnoïde et Pie-mère)
Ectomésenchyme	Squelette craniofacial Odontoblastes Tissu conjonctif et musculaire de la paroi des gros vaisseaux dérivés des arcs aortiques Septum cardiaque, valvules semi-lunaires Tissu conjonctif des glandes pituitaires, lacrymales, salivaires, thyroïde, parathyroïdes et du thymus.. Contribution aux muscles striés de la face et du cou

- **Les anomalies des crêtes neurales réalisent des neurocristopathies** : les neurocristopathies regroupent des pathologies d'une grande diversité clinique et génétique. Elles réalisent des tableaux cliniques comme la maladie de Hirschsprung (mégacolon congénital, absence d'innervation de la partie terminale du colon) (le gène RET nécessaire à la migration des crêtes neurales est le gène majeur de cette maladie), l'albinisme (défaut de pigmentation)...

3- CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LE DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME NERVEUX CENTRAL

- Le développement du tube neural s'accompagne de la formation de paires de somites résultant de la métamérisation du mésoderme para-axial. La 1^{re} paire de somites apparaît à la fin de la 3^e semaine. 44 paires de somites se mettent en place au cours du développement. Les somites sont à l'origine du squelette, de la musculature et du derme.
- Les multiplications cellulaires et les migrations cellulaires sont très différentes tout au long du tube neural. Il en résulte la formation de plicatures, d'épaississement, d'invaginations et d'évaginations. Ainsi, avant même la fermeture du tube neural, la partie craniale est nettement plus développée et se présente sous forme de 3 vésicules cérébrales qui donneront 5 vésicules.
- La lumière du tube neural correspond aux 4 ventricules de l'encéphale, à l'aqueduc de Sylvius et au canal de l'épendyme.
- Deux zones d'évolution différente se distinguent dans le tube neural :
 - La partie caudale qui se « métamérise » et forme la moelle épinière.
 - La partie céphalique formant l'encéphale, la rétine, l'épiphyse et la neurohypophyse.
- La naissance ne marque pas l'arrêt de la croissance et de la différenciation des neurones. La durée postnatale de ces phénomènes varie selon les régions du système nerveux central.
- Le système nerveux central se caractérise par sa relative plasticité et par la nécessité d'être stimulé par son environnement pour stabiliser ses synapses. L'absence de stimulation provoque une régression.

4- DÉVELOPPEMENT DE LA PARTIE CAUDALE : LA MOELLE ÉPINIÈRE

4.1. DÉVELOPPEMENT NORMAL

4.1.1. MOELLE ÉPINIÈRE ET SOMITES

La moelle épinière ne se métamérise pas anatomiquement comme les somites, mais elle est virtuellement segmentée puisqu'elle est formée d'unités fonctionnelles, **les neuromères**. À chaque neuromère correspond une paire de somites, un de chaque côté. Chaque somite donne 3 dérivés qui sont, du tube neural vers la périphérie, le sclérotome, le myotome et le dermatome.

Évolution des sclérotomes : (fig 4)

Les cellules issues d'une même paire de somites migrent vers la ligne médiane pour entourer la corde, au niveau du même neuromère et constitue un sclérotome.

Ainsi une succession de sclérotomes se mettent en place, chacun étant associé à une paire de nerfs spinaux. Le corps d'une vertèbre est constitué à partir de 2 demi-sclérotomes contigus. L'espace entre 2 corps vertébraux formera le disque intervertébral. La corde régresse entièrement au niveau des corps vertébraux, et persiste au centre de chaque disque intervertébral, constituant le nucleus pulposus.

Dorsalement, le tube neural induit une condensation mésenchymateuse formant l'arc vertébral.

Évolution des myotomes :

Les myotomes donnent les muscles du dos, de l'abdomen et du thorax. Au départ chaque myotome est innervé par une racine antérieure motrice. Ultérieurement l'innervation de chaque muscle sera pluriradiculaire et complexe, du fait de la constitution de plexus nerveux et de la colonisation nerveuse des muscles des membres, formés à partir du mésenchyme des bourgeons des membres.

Évolution des dermatomes :

Un dermatome correspond au territoire cutané dont le derme provient d'un somite donné et qui est innervé par la racine sensitive rachidienne et le ganglion rachidien du neuromère correspondant.

Les dermatomes sont juxtaposés au niveau du tronc. Ils sont étirés au niveau des membres au moment de la poussée de ceux-ci. Certains territoires peuvent se superposer partiellement.

4.1.2. HISTOGENÈSE DE LA MOELLE ÉPINIÈRE (FIG 5 - 6) :

Au stade de tube neural récemment fermé, la paroi est constituée par un seul type de cellules, formant un épithélium pseudostratifié épais : **le neuro-épithélium**.

Les cellules du neuro-épithélium vont se diviser un grand nombre de fois par mitoses successives, tout en restant accrochées aux faces externes et internes du tube neural. Ces cellules neuroépithéliales vont donner naissance aux cellules souches : des neurones (**les neuroblastes**), des cellules gliales (**les glioblastes**) et des cellules épendymaires (**épendymoblastes**).

Lorsque la paroi d tube neural s'épaissit, des cellules se détachent de la face interne et migrent. Ainsi 3 régions se mettent en place au niveau de la paroi, de la lumière vers l'extérieur :

- **Le neuro-épithélium prolifératif** où s'effectuent les mitoses. À la fin de l'étape de prolifération, les cellules qui resteront en bordure du canal épendymaire formeront les cellules épendymaires.
- **Le manteau** qui comporte les neuroblastes et les glioblastes. Les neuroblastes perdent leur pouvoir mitotique en dehors du neuro-épithélium, sauf dans le cortex cérébelleux fœtal. Le manteau correspond à la future substance grise.
- **Le voile marginal**, situé sous les futures méninges. Il comporte un faible taux de neuroblastes et de glioblastes. La région du voile marginal deviendra substance blanche.

La migration des neurones nécessite la présence de cellules gliales particulières, tendues entre la lumière et la périphérie du tube et qui servent de guide.

Le développement de la zone du manteau avec la différenciation des neuroblastes entraîne un épaississement des régions dorsales et ventrales de la moelle épinière :

- **Les lames fondamentales** représentent les épaississements ventraux et qui donneront les cornes motrices de la moelle.
- **Les lames alaires** représentent les épaississements dorsaux et qui donneront les cornes sensitives de la moelle.

Entre les lames fondamentales et les lames alaires, on peut observer le développement des cornes intermédiaires.

Les neuroblastes qui ont migré dans la zone du manteau sont arrondis (apolaires). Ils vont progressivement émettre 2 prolongements cytoplasmiques diamétralement opposés et deviennent bipolaires. Un des prolongements s'allonge et devient axone, l'autre se ramifie en dendrites.

Les glioblastes migrent du neuro-épithélium vers la zone du manteau et le voile marginal où ils se différencient en astrocytes et en oligodendrocytes.

À noter que les cellules microgliales ont une origine différente : mésenchymateuse.

4.1.3. LONGUEUR DE LA MOELLE PAR RAPPORT AU RACHIS ET À LA DURE-MÈRE (FIG 7) :

- Au 3^e mois du développement, le rachis a la même longueur que la moelle.
- La colonne vertébrale et la dure-mère s'allongent ensuite plus rapidement que la moelle.
- À la naissance, l'extrémité de la moelle est située au niveau de L2 – L3.
- Chez l'adulte, le cône médullaire n'arrive plus qu'au niveau de L1-L2.

Les racines rachidiennes des niveaux sous-jacents se regroupent pour former la queue de cheval.

Dans cette région dépourvue de moelle, la ponction lombaire est possible pour prélever le liquide céphalo-rachidien.

4.2. MALFORMATIONS DE LA PARTIE CAUDALE (fig 8) :

4.2.1. RACHISCHISIS

Il est dû à la non-fermeture de la gouttière neurale en tube au niveau caudal.

Dans cette malformation, la région de la moelle est en forme de gouttière, ouverte à l'extérieur ; elle est en continuité avec la peau. Cette malformation est létale.

Le diagnostic prénatal est possible par échographie et par dosage de l'alpha fœtoprotéine sérique chez la mère et l'acétylcholine estérase au niveau du liquide amniotique.

4.2.2. SPINA BIFIDA APERTA

Elle est due à la non-fermeture du neuropore postérieur. Le tissu nerveux est largement exposé à la surface, en continuité avec la peau.

Cette malformation semble due à une carence en acide folique. Le traitement préventif par l'acide folique chez « les femmes à risque » fait nettement diminuer l'apparition de cette malformation.

4.2.3. MALFORMATION DES VERTÈBRES AVEC UN TUBE NEURAL FERMÉ

Fermeture incomplète de l'arc postérieur d'une vertèbre : spina bifida occulta.

Cette malformation est généralement détectée par l'imagerie de façon fortuite. Elle est généralement située dans la région lombaire. Une touffe de poils dans cette région peut attirer l'attention et faire indiquer un examen radiologique.

2 vertèbres adjacentes ou plus sont touchées

Il en résulte l'apparition d'une formation kystique qui correspond :

- Soit à **une méningocèle**, lorsque le kyste correspond à une saillie des méninges à travers l'orifice. Ce kyste méningé est recouvert de peau. La moelle épinière est en place.
- Soit à **une myélo-méningocèle**. Dans ce cas, le kyste correspond à une saillie des méninges contenant la moelle.

Sinus dermique congénital

Il correspond à un fin canal reliant les méninges à la peau et qui s'ouvre à l'extérieur.

5- DÉVELOPPEMENT DE LA PARTIE CÉPHALIQUE (fig 9) :

5.1. GÉNÉRALITÉS

- Avant la fermeture du neuropore antérieur, la partie céphalique est constituée de 3 vésicules, respectivement du plus cranial au moins cranial : **le prosencéphale, le mésencéphale et le rhombencéphale**. Deux courbures sont alors visibles : **les courbures céphalique et cervicale**.
- À la 5^e semaine, la partie craniale du tube neural est constituée de 5 vésicules, d'avant en arrière : **le télencéphale, le diencéphale, le mésencéphale, le métencéphale et le myélencéphale**. Une 3^e courbure apparaît en sens inverse des 2 premières et située entre le métencéphale et le myélencéphale : c'est la **courbure pontique**.
- Quelle que soit la zone de la partie céphalique considérée, il y a mise en place d'un neuro-épithélium, d'un manteau et d'un voile marginal.
Latéralement, on retrouve des lames alaires sensibles et des lames fondamentales motrices séparées par le sulcus limitans (fig.5). La partie supérieure du tube neural constitue un toit mince. La partie inférieure forme le plancher.
Le devenir de ces différentes structures varie selon la vésicule cérébrale considérée.

5.2. DEVENIR DES DIFFÉRENTES VÉSICULES :

5.2.1. LE MYÉLENCÉPHALE (FIG.10)

Il donne le bulbe rachidien. Les parois latérales du myélencéphale sont similaires à celles de la moelle. Le toit est « étiré » et formera la toile et les plexus choroïdiens recouvrant une cavité : le 4^e ventricule.

Certaines zones du toit du 4^e ventricule disparaissent vers le 4^e mois, laissant place aux 2 trous de Luschka et au trou de Magendie. Ces 3 trous permettent la circulation du LCR entre les ventricules et les espaces sous-arachnoïdiens.

5.2.2. LE MÉTENCÉPHALE (FIG.11)

- Sa partie ventrale (lames fondamentales et le plancher) donne la **protubérance**.
- Sa partie dorsale (lames alaires et toit) va former le cervelet qui commence à se développer vers le 40^e jour de la vie embryonnaire.

Les lames alaires s'épaississent, fusionnent et forment la **plaque cérébelleuse**, avec une partie médiane le vermis médian et 2 renflements latéraux, les lobes latéraux du cervelet. Initialement, la plaque cérébelleuse comporte une couche neuro-épithéliale, un manteau et un voile marginal.

Au cours du développement, certaines cellules neuroépithéliales migrent jusqu'au voile marginal, pour former la couche granulaire externe où les cellules continuent à se diviser. D'autres cellules neuroépithéliales migrent, s'arrêtent dans la partie interne du voile marginal et perdent leur pouvoir mitotique : ce sont les futures cellules de Purkinje. Cette disposition en 2 couches est caractéristique du **cortex cérébelleux fœtal**. Cette disposition en 2 couches disparaît complètement vers l'âge de 18 mois lorsque divisions et migrations cellulaires s'arrêtent.

Au cours du 6^e mois de la vie embryonnaire, la couche granulaire externe donne des cellules qui migrent sous les cellules de Purkinje : ce sont les cellules de la couche des grains du cervelet. D'autres cellules s'arrêtent au niveau des cellules de Purkinje : ce sont les cellules à corbeille. Celles qui ne migrent pas, restent au niveau du voile marginal et donnent les cellules étoilées superficielles.

Toutes ces migrations de neurones continuent en post-natal **jusqu'à l'âge de 18 mois**. Le **cortex cérébelleux définitif** sera alors en place. Les cellules du manteau qui n'ont pas migré forment les **noyaux profonds du cervelet**. Les sillons se développent à partir du 4^e mois du développement.

5.2.3. LE MÉSENCÉPHALE (FIG.10)

C'est la plus primitive des vésicules cérébrales.

Sa partie inférieure (lames fondamentales et plancher) donne **les pédoncules cérébraux**. Sa partie supérieure (lames alaires et toit) donne **les tubercles quadrijumeaux**.

La cavité du mésencéphale se rétrécit par suite du développement de ses parois et forme l'aqueduc de Sylvius qui relie le 3^e et le 4^e ventricules.

5.2.4. LE DIENCÉPHALE (FIG.12)

Le toit est constitué d'une seule couche de cellules qui s'associent avec du mésenchyme pour former les plexus du 3^e ventricule.

La partie caudale du toit donne une évagination qui représente l'ébauche de **l'épiphyse**.

Le reste du diencéphale développe **le thalamus, l'hypothalamus et le pallidum**.

Le plancher du diencéphale donne naissance aux **vésicules optiques primitives** (à l'origine de la rétine) et à la **neurohypophyse**.

5.2.5. LE TÉLÉNCÉPHALE (FIG.12)

Le développement de l'encéphale est très important chez les mammifères et particulièrement chez l'homme.

Le télencéphale donne :

- 2 évaginations latérales, les hémisphères cérébraux,
- une partie centrale, la lame terminale de l'hypothalamus (qui correspond à la zone de fermeture du neuropore antérieur).
- le corps strié au niveau du plancher qui s'est considérablement épaissi.

Les hémisphères cérébraux s'accroissent d'une manière considérable latéralement et surtout en direction caudale, recouvrant les autres parties du cerveau.

La paroi des hémisphères cérébraux s'épaissit et la surface se plisse. Les circonvolutions et les lobes pariétaux, occipitaux et frontaux apparaissent. La scissure de Sylvius est visible au 5^e mois du développement. Toutes les grandes scissures sont présentes à la naissance. Le plissement du cortex se continue jusqu'à la naissance. Le plissement se poursuit rapidement jusqu'à 2 à 3 ans, plus lentement ensuite. Le cerveau cesse d'accroître son volume vers 20 ans.

Histogenèse du cortex cérébral :

Vers la fin du 2^e mois, la paroi des hémisphères cérébraux présente de la lumière vers la surface, une couche neuroépithéliale, un manteau et un voile marginal.

Les futures cellules du cortex cérébral migrent à partir du neuro-épithélium sur de longues distances grâce à des guides gliaux. Les premières cellules corticales mettent en place un **cortex primordial**. Ce cortex est ensuite divisé en 2 couches par l'arrivée des cellules qui formeront la couche VI du **cortex adulte**. Les migrations se poursuivent pour former les différentes couches du cortex. Les couches les plus profondes sont les plus anciennes et les couches les plus superficielles sont les plus récentes.

Cette histogenèse dure de la 9^e à la 16^e semaine.

Avant que les neurones ne développent leurs prolongements, un certain nombre d'entre eux dégénèrent par **apoptose** (mort programmée).

L'enfant à terme naît avec l'essentiel de ses neurones, de ses fibres nerveuses et de ses cellules gliales. Seules les cellules gliales continueront à se multiplier. Les neurones développent leurs prolongements dendritiques et axonaux jusqu'à l'âge de 2 ans. Les stimulations du milieu environnant augmentent le nombre d'épines dendritiques, sièges des connexions cellulaires et permettent de stabiliser les synapses.

Évolution du corps strié :

Il va être assez rapidement traversé par de nombreux axones des cellules pyramidales, individualisant deux noyaux, le noyau caudé et le noyau lenticulaire constitué du putamen et du pallidum.

5.3. MISE EN PLACE DES COMMISSURES

Une commissure relie entre elles des zones du cortex cérébral. De bas en haut, les principales commissures qui se développent sont :

Le chiasma optique, la commissure blanche antérieure, le trigone et le corps calleux.

La commissure blanche antérieure apparaît la 1^{re} vers le 3^e mois.

Le trigone et le corps calleux s'étendent vers l'arrière et forment un système d'intercommunication très développé entre les 2 hémisphères.

5.4. MYÉLINISATION

La myélinisation débute au 4^e mois prénatal. Elle n'est totale qu'après 3 ans et s'effectue à des périodes différentes selon les territoires. La myélinisation des fibres motrices descendantes s'effectue entre 1 et 2 ans, ceci s'ajoute au développement complet du cervelet, permettant l'acquisition de la marche (12-18 mois). La myélinisation est réalisée par les oligodendrocytes dans le système nerveux central.

5.5. MALFORMATIONS DE L'ENCÉPHALE (FIG.13)

Les malformations de l'encéphale sont souvent graves et associées à des malformations de la face. Elles sont souvent létales. Les causes sont multifactorielles et encore mal connues.

Elles peuvent être endogènes (facteur héréditaire) ou exogènes (nutritionnelles, physiques, virales, parasitaires, chimiques, médicamenteuses). L'encéphale est sensible aux agents tératogènes durant toute la vie intra-utérine et après la naissance puisque son développement n'est pas tout à fait achevé à la naissance.

5.5.1. TROUBLES DE FERMETURE DE LA GOUTTIÈRE NEURALE AU NIVEAU CRANIAL

Elle entraîne une anencéphalie (1/100 naissances). Le diagnostic prénatal peut se faire par échographie. C'est une anomalie létale qui s'associe souvent au rachischisis réalisant un cranio-rachischisis.

5.5.2. LES DÉFAUTS DE FERMETURE DU CRÂNE OSSEUX

Le développement du tube neural induit la formation du crâne osseux à partir du mésenchyme environnant. Les malformations par défaut de fermeture du crâne osseux siègent dans la région occipitale et dans la région frontale.

Selon la taille de l'orifice, on distingue (de l'anomalie la moins grave à la plus grave) :

- **Méningocèle** : c'est une hernie des méninges au niveau d'un orifice crânien.
- **Méningo-encéphalocèle** : les méninges et le tissu nerveux font saillie sous la peau à travers un orifice crânien.
- **Méningo-hydro-encéphalie** : l'orifice laisse passer les méninges, le tissu cérébral et une partie des cavités ventriculaires.

5.5.3. LES ANOMALIES DE LA LIGNE MÉDIANE

Forment un vaste groupe de pathologies cérébrales touchant le développement du cerveau antérieur (prosencephale). Elles comportent essentiellement les holoprosencéphalies (absence de séparation du télencéphale en deux hémisphères et deux ventricules) et les anomalies de la commissuration dominée par l'agénésie du corps calleux.

5.5.4. HYDROCÉPHALIE CONGÉNITALE

C'est une dilatation ventriculaire avec accumulation anormale de LCR. Cette accumulation peut avoir plusieurs causes : l'excès de production (anomalie génétique, récessive liée au sexe), obstacle à la circulation du LCR (obstruction des trous de Lushka, de Magendie ou de l'aqueduc de Sylvius), ou le défaut de résorption du LCR.

5.5.5. MALFORMATIONS DU CERVELET

- Agénésie du cervelet
- Hémi agénésie du cervelet
- Hypoplasie du cervelet

Les causes sont en général d'origine vasculaire. Elles peuvent être métaboliques ou héréditaires.

5.5.6. TROUBLES DE L'HISTOGENÈSE

Le programme d'organisation du cortex peut être perturbé plus ou moins gravement.

- certaines perturbations intervenant au cours de la première moitié de la grossesse entraînent des malformations majeures :
 - **Microcerveau** : le cerveau à un poids 10 fois plus faible que le poids moyen. Cette malformation serait due à une insuffisance de prolifération du neuro-épithélium.
 - **Lissencéphalie** (absence de circonvolution) : cette malformation est due à une destruction des guides gliaux. Elle est en général associée à une agénésie du corps calleux. Elle n'est pas compatible avec une vie au-delà de 2 ans.
- Des malformations mineures peuvent également être observées à la suite de l'action tardive d'un facteur tératogène :

Exemple : présence des neurones ectopiques au niveau des méninges (lorsqu'ils ont migré par excès) ou en position péri ventriculaire (lorsqu'ils n'ont pas suffisamment migré).

6- FORMATION DES MÉNINGES

Le mésenchyme qui entoure le tube neural se condense et constitue une enveloppe appelée méninge primitive dont les cellules internes (leptoméninges) dérivent des crêtes neurales. La dure-mère dérive du mésenchyme et se différencie plus tard.

Figure 1

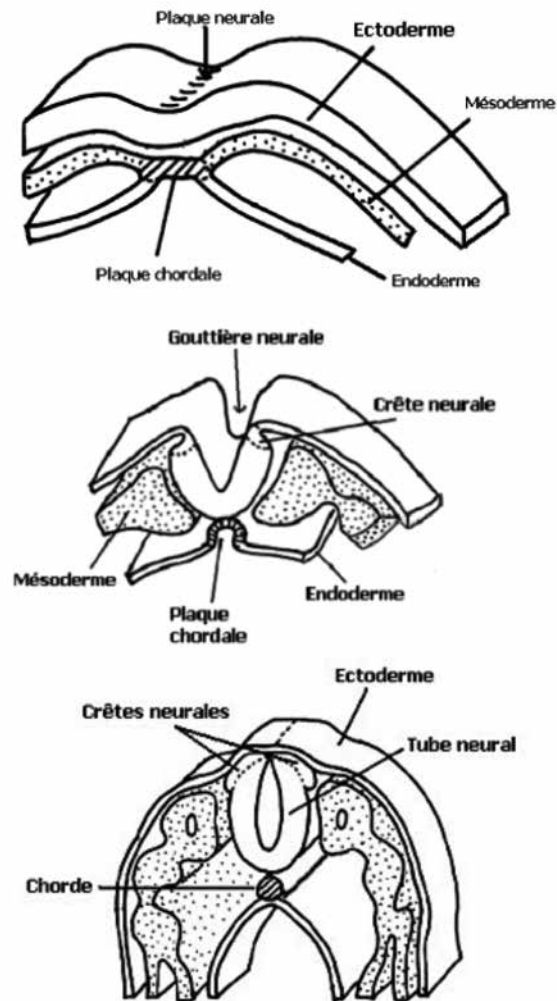
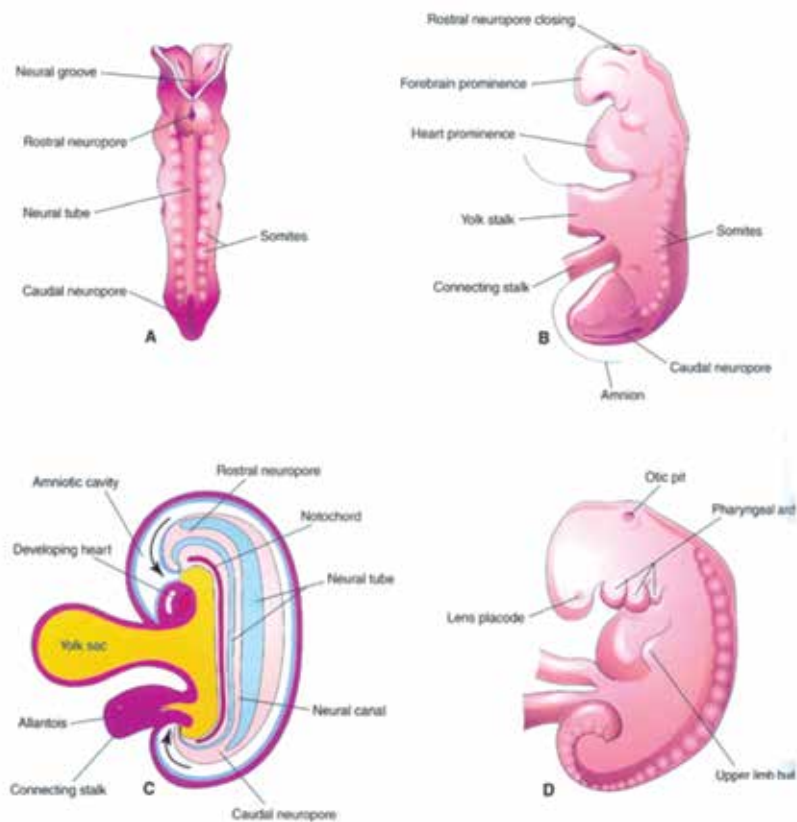


Figure 2



A, Dorsal view of an embryo of about 23 days, showing fusion of the neural folds, forming the neural tube. B, Lateral view of an embryo of about 24 days, showing the forebrain prominence and closing of the rostral neuropore. C, Diagrammatic sagittal section of this embryo showing the transitory communication of the neural canal with the amniotic cavity (arrow). D, Lateral view of an embryo of about 27 days, note that the neuropores shown in B are closed.

Figure 3: Dérivés des crêtes neurales

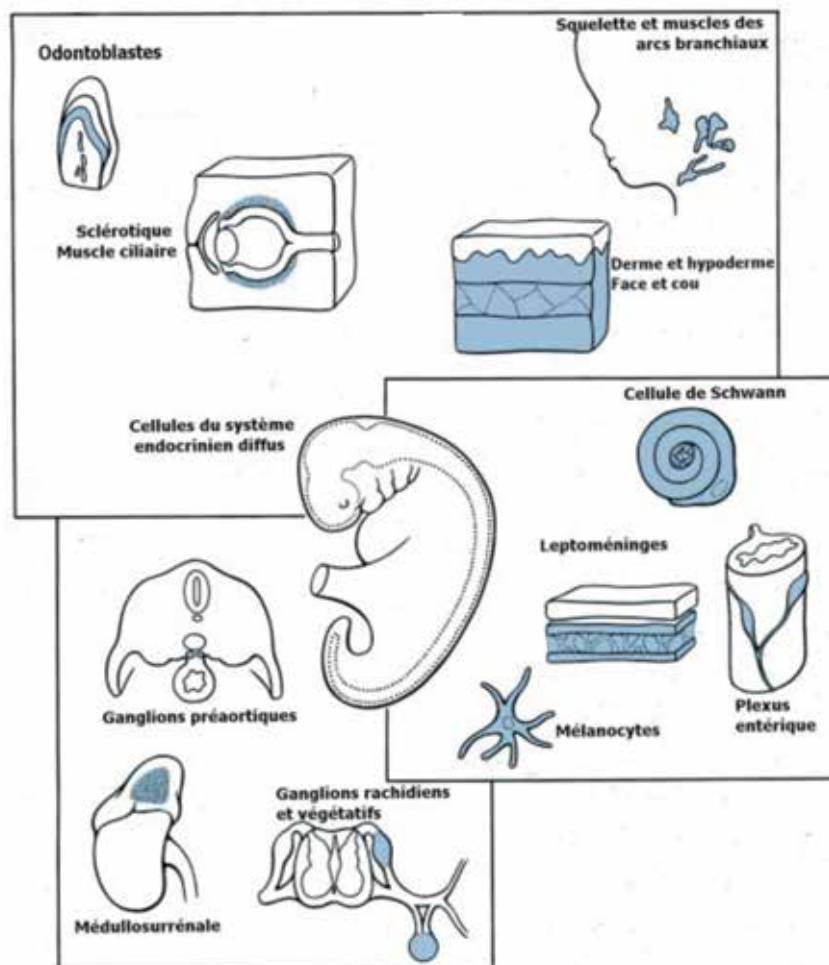


Figure 4: Développement du rachis

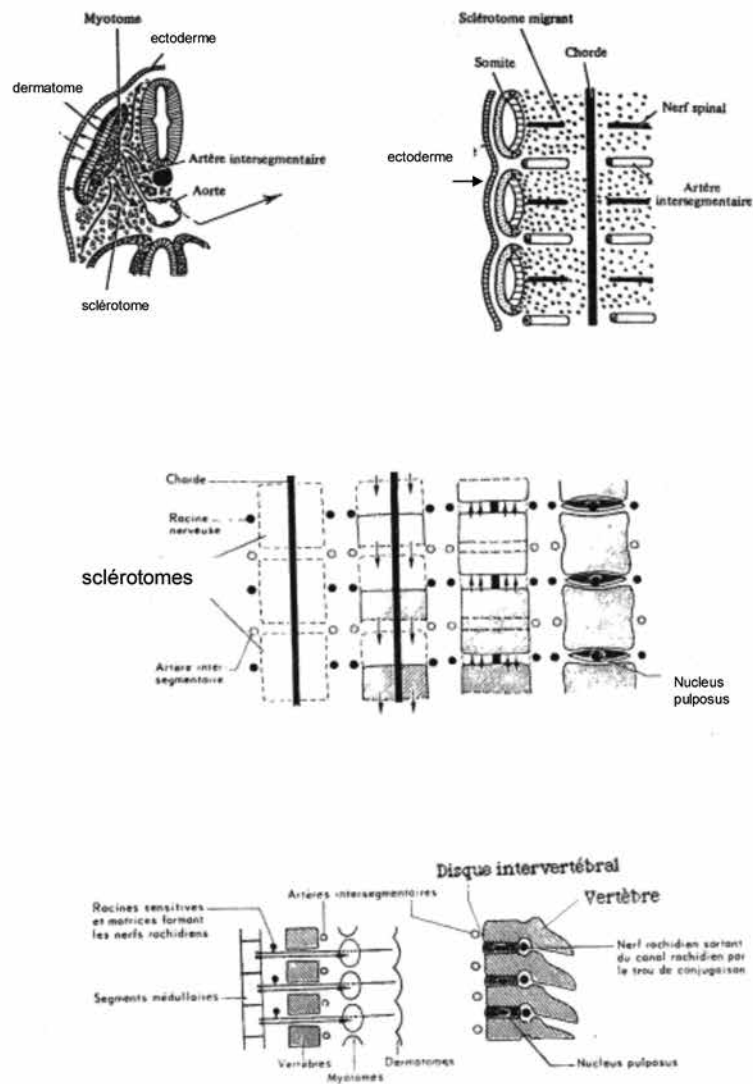


Figure 5

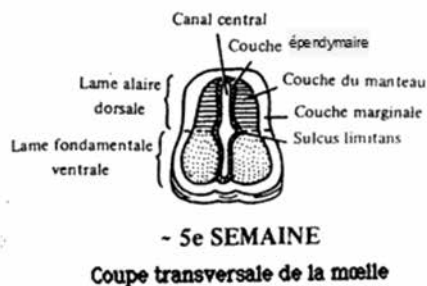


Fig.5 : Histogenèse de la moelle

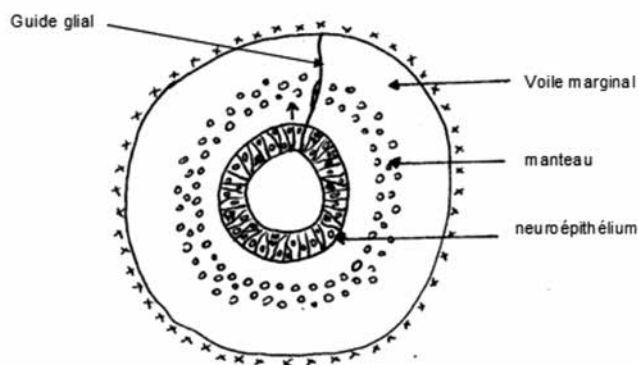
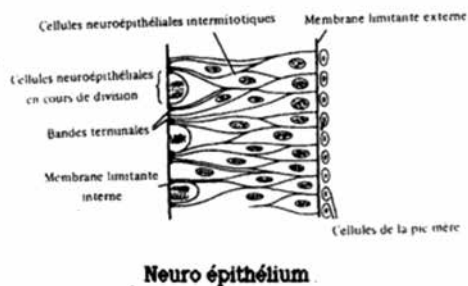


Fig 6: Histogenèse des cellules du système nerveux central

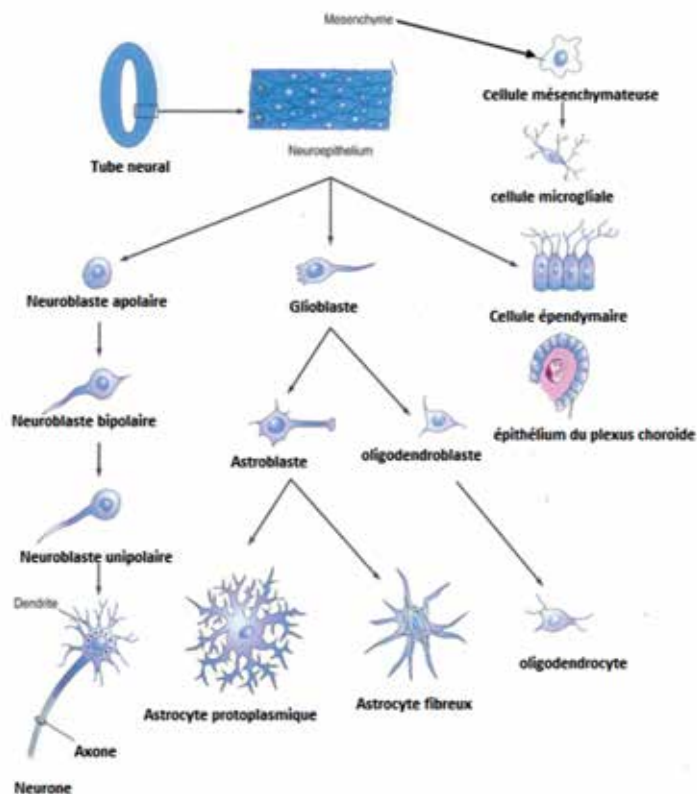


Fig.7 : Rapports de la Moelle épinière et de la colonne vertébrale à différents stades du développement. A) vers le 3ème mois. B) A la fin du 5ème mois. C) Chez le nouveau né.

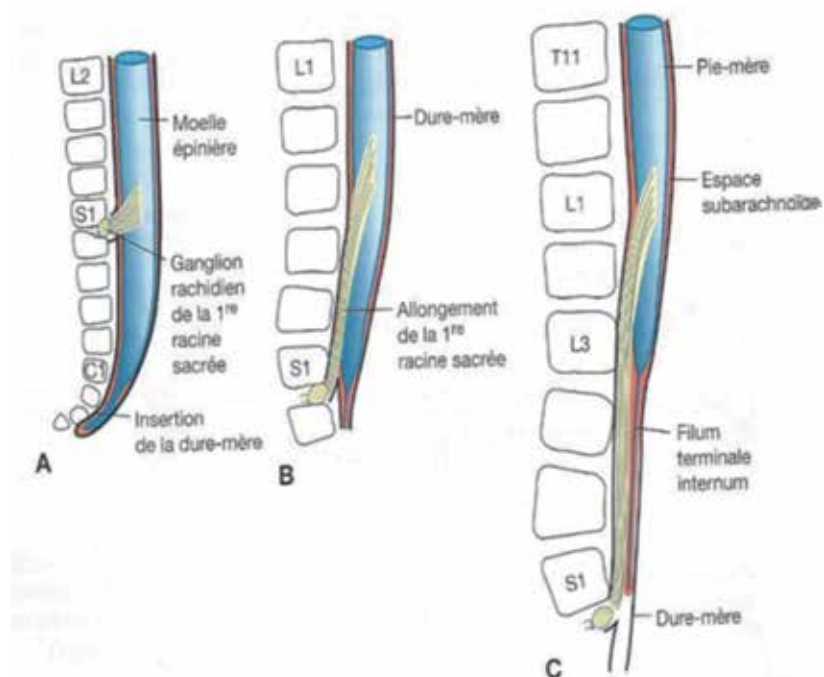


Figure 8

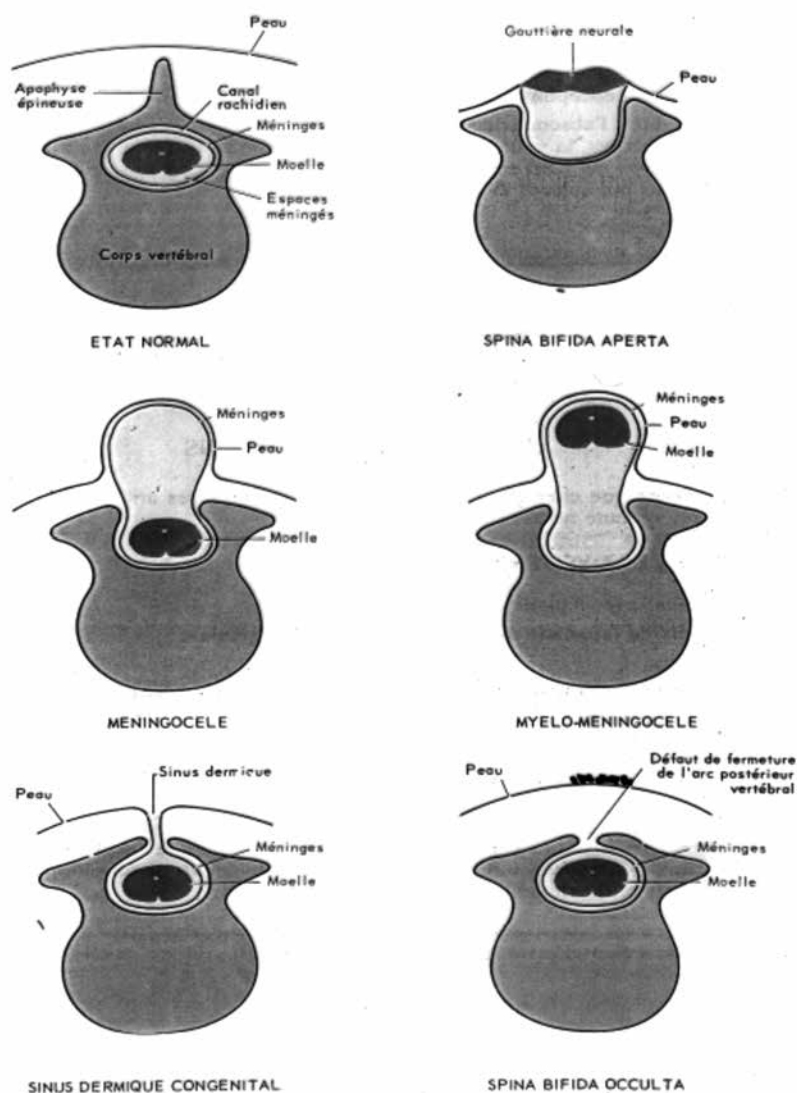
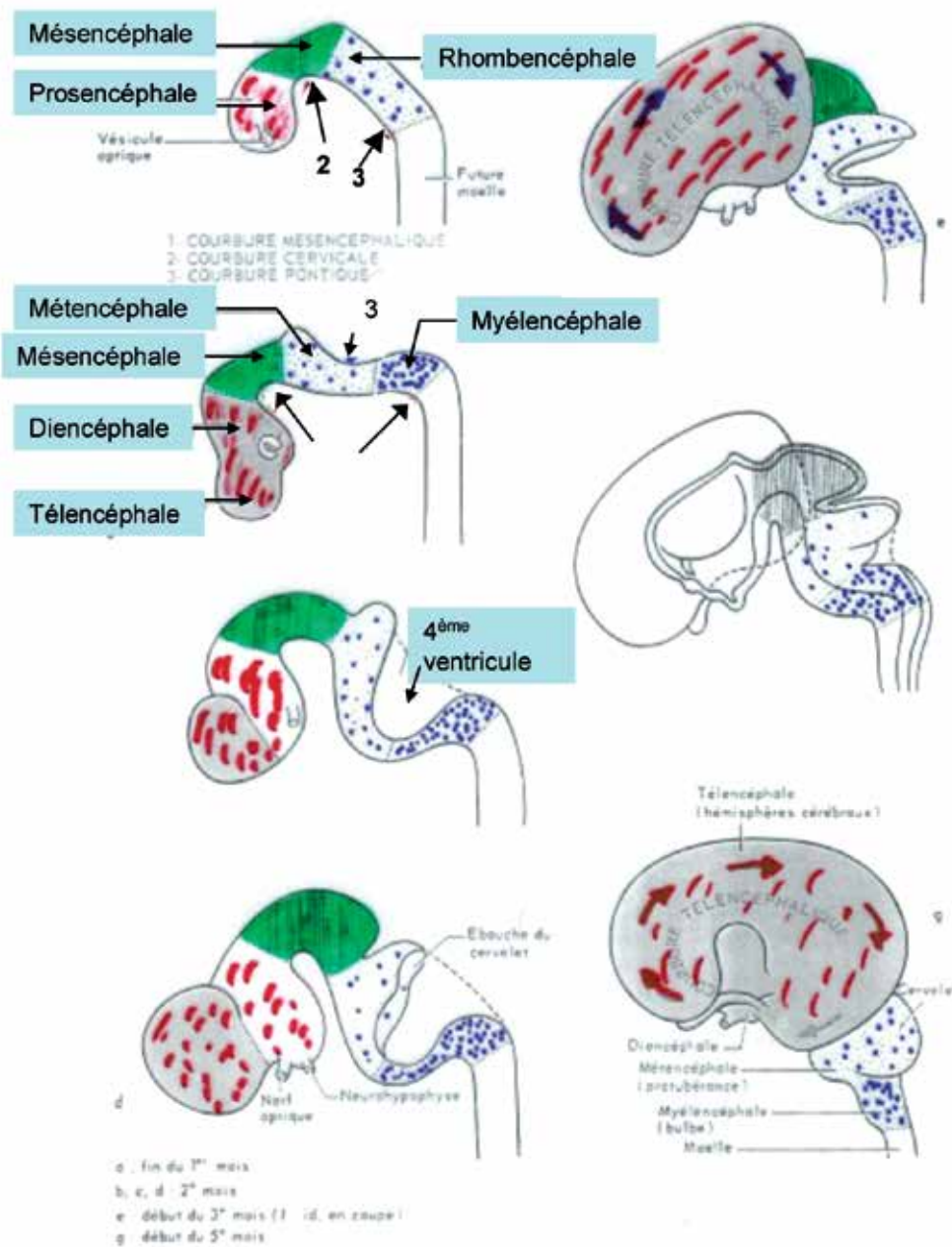


Figure 9

LE DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME NERVEUX



LE TRONC CÉRÉBRAL ET LE CERVELET

Figure 10

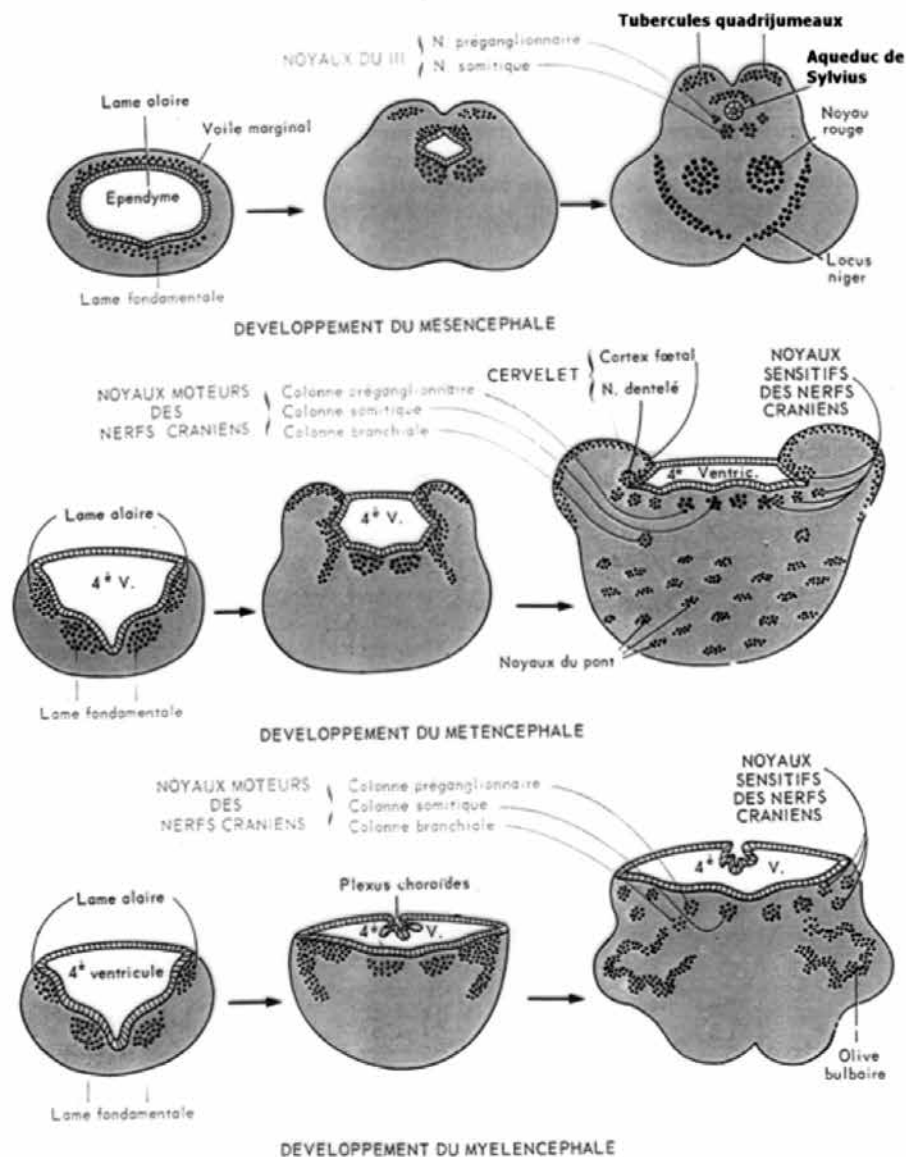
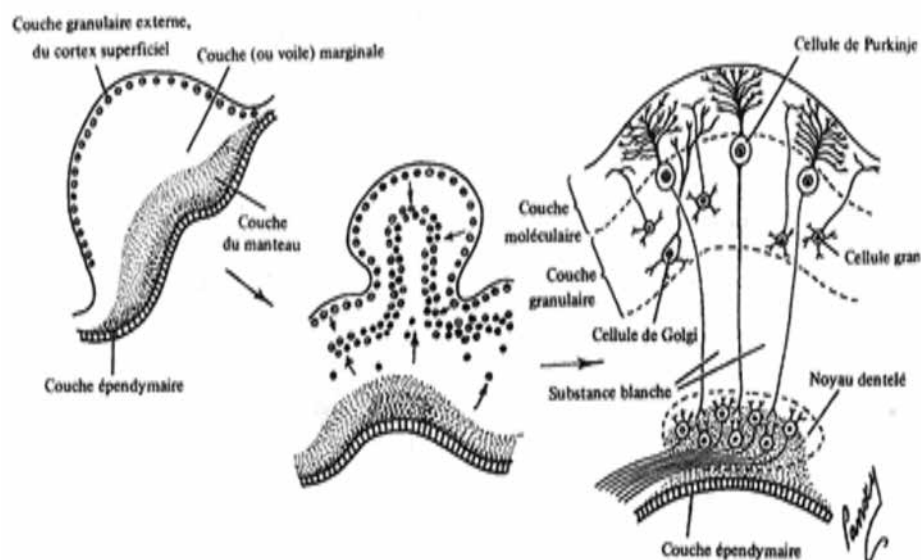
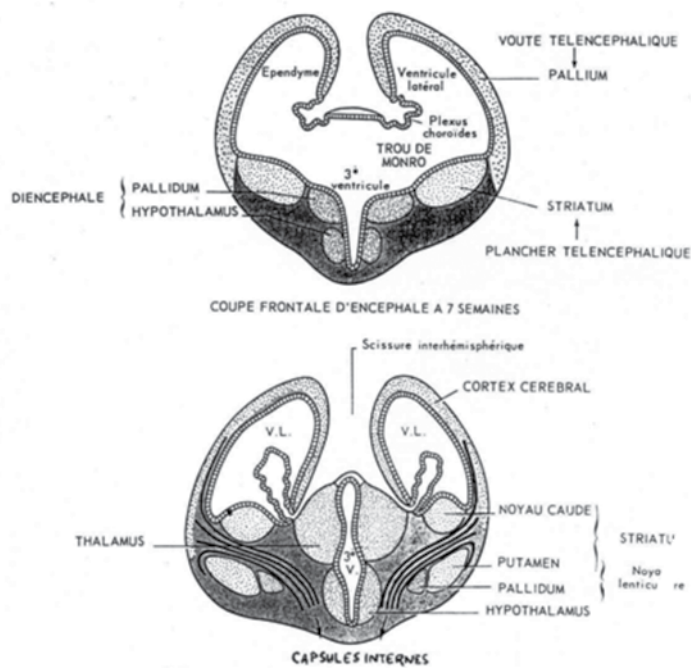
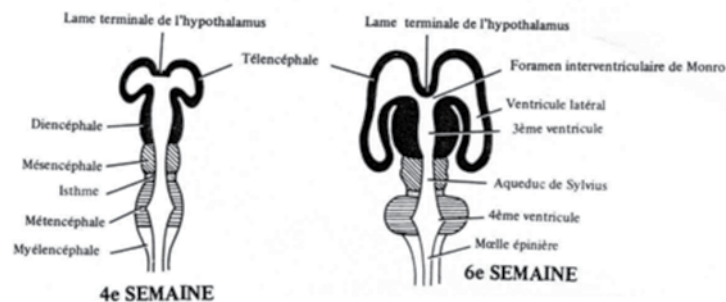


Fig 11: Histogenèse du cervelet

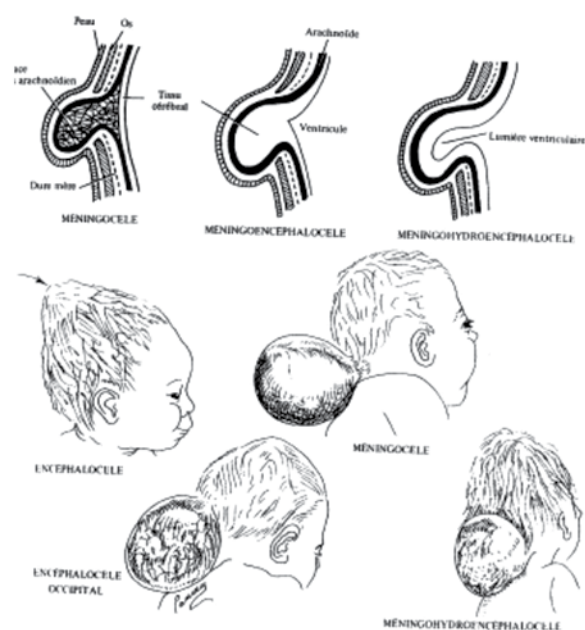




Evolution du diencéphale et du télencéphale

Fig 12

Figure 13



Malformation de la partie céphalique du tube neural

HISTOLOGIE ET EMBRYOLOGIE DE L'OEIL

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. Localiser et décrire les milieux transparents de l'œil
2. Décrire la structure des tuniques fibreuses et vasculaires de l'œil
3. Citer dans l'ordre les différentes couches de la rétine
4. Décrire les différents types cellulaires de la rétine
5. Décrire l'ultrastructure des cellules photoréceptrices de la rétine
6. Indiquer les particularités régionales de la rétine
7. Décrire la structure des paupières et des glandes lacrymales
8. Préciser l'origine embryologique des différents constituants du globe oculaire.
9. Décrire les différentes étapes embryologiques de la formation et de l'évolution des vésicules optiques primitives.
10. Décrire les étapes du développement des milieux transparents de l'œil
11. Décrire le développement embryologique de l'iris et des procès ciliaires
12. Expliquer les mécanismes embryologiques du colobome oculaire, de la cataracte postérieure, de la cataracte antérieure et du glaucome congénital.

PLAN

1. HISTOLOGIE DE L'OEIL

1.1 LES MILIEUX TRANSPARENTS DE L'OEIL:

- 1.1.1 LA CORNÉE
- 1.1.2 LE CRISTALLIN
- 1.1.3 L'HUMEUR AQUEUSE
- 1.1.4 LE CORPS VITRÉ

1.2 LES TUNIQUE FIBREUSES ET VASCULAIRES

- 1.2.1 LA SCLÉROTIQUE
- 1.2.2 L'UVÉE

1.3 LA TUNIQUE SENSORIELLE : LA RÉTINE

- 1.3.1 LES DIFFÉRENTES COUCHES DE LA RÉTINE
- 1.3.2 LES PHOTORÉCEPTEURS

1.3.3 LES NEURONES

1.3.4 LES CELLULES GLIALES

1.3.5 ZONES PARTICULIÈRES DE LA RÉTINE

1.3.6 VASCULARISATION DE LA RÉTINE

1.4 LES ANNEXES DE L'OEIL

1.4.1 LES PAUPIÈRES

1.4.2 LES GLANDES LACRYMALES

2. EMBRYOLOGIE DE L'OEIL

2.1 ÉVOLUTION DE L'ÉPIBLASTE ET DU NEURECTOBLASTE

2.2 ÉVOLUTION DU MÉSENCHYME

2.3 LES ANNEXES DU GLOBE OCULAIRE

1. HISTOLOGIE DE L'OEIL

Les yeux sont des organes spécialisés dans la détection et l'analyse des signaux lumineux. On peut les considérer comme des chambres noires dont le fond est tapissé par la rétine, structure sensorielle sensible aux photons et donnant naissance aux influx nerveux. La rétine est entourée, protégée et nourrie par des enveloppes conjonctives et vasculaires. La lumière traverse des milieux transparents qui permettent d'obtenir une image nette sur la rétine (Fig. 1)

1. 1 LES MILIEUX TRANSPARENTS DE L'OEIL :

1.1.1 LA CORNÉE (FIG. 2)

Elle est transparente, avasculaire et constituée d'un stroma conjonctif revêtu antérieurement par un épithélium pavimenteux stratifié non kératinisé et postérieurement par un épithélium aplati simple.

Le stroma qui occupe 90% de l'épaisseur de la cornée, il est formé d'un tissu conjonctif dense, transparent, pauvre en cellules et comporte des faisceaux de fibres de collagène disposés parallèlement à la surface de la cornée. Chaque faisceau forme un angle d'environ 90 ° avec les faisceaux voisins, ce qui évite toute polarisation de la lumière. La substance fondamentale est riche en GAG sulfatés et s'insinue entre les faisceaux.

L'épithélium antérieur repose sur la membrane de BOWMAN (lame basale épaisse). Cet épithélium est pavimenteux stratifié non kératinisé, non papillaire, formé d'environ 5 couches de cellules. Il se renouvelle rapidement et peut cicatriser en cas de lésion. Sa surface est continuellement maintenue humide par le film lacrymal.

L'épithélium postérieur est pavimenteux simple reposant sur une lame basale : la membrane de DESCMET.

La transparence de la cornée est due :

- à son degré d'imbibition
- à la disposition particulière des éléments fibrillaires et à leur orientation parallèle ou perpendiculaire à la lumière
- à l'absence de vaisseaux
- à l'absence de papilles et de crêtes épithéliales au niveau de l'épithélium antérieur.

La cornée qui ne contient aucun vaisseau sanguin ni lymphatique se nourrit essentiellement par imbibition à partir de l'humeur aqueuse.

1.1.2 LE CRISTALLIN (FIG. 3)

C'est une lentille biconvexe d'environ 1 cm de diamètre, transparente et avasculaire. Il comporte un **épithélium antérieur simple cubique**, des fibres cristalliniennes et une zone équatoriale proliférative. Le cristallin est entouré par une capsule fibreuse : **la cristalloïde**. Il est attaché aux corps ciliaires par des ligaments suspenseurs formés par des fibres aménageant des espaces à travers lesquels circule l'humeur aqueuse qui l'humidifie. Le cristallin est déformable, ce qui fait varier la distance focale. Avec le vieillissement sa déformabilité diminue (c'est la presbytie) et il peut perdre de sa transparence (c'est la cataracte).

1.1.3 L'HUMEUR AQUEUSE

C'est un liquide de composition très proche de celle du plasma sanguin, élaboré par les procès ciliaires. Il circule de la **chambre postérieure** (cavité située entre le l'iris et le cristallin) vers **la chambre antérieure** (cavité située entre la cornée, l'iris et la pupille). Il est drainé par le **canal de Schlemm** (situé dans l'angle iridocornéen) vers le système veineux.

1.1.4 LE CORPS VITRÉ

C'est une masse gélatineuse transparente et avasculaire, composé d'eau, et de mucopolysaccharides (acide hyaluronique), de fibrilles condensées en périphérie et de cellules. Il remplit l'espace qui s'étend du cristallin à la papille optique.

1.2 LES TUNIQUES FIBREUSES ET VASCULAIRES

1.2.1 LA SCLÉROTIQUE

Elle est constituée d'une couche de tissu conjonctif dense peu vascularisé, pauvre en cellules, riche en fibres élastiques et en fibres de collagène toujours orientées parallèlement à la surface du globe oculaire. Elle cicatrise difficilement. La sclérotique ou sclère se continue en avant avec le stroma de la cornée et en arrière avec la dure mère qui entoure le nerf optique. Dans la partie postérieure de l'œil, les fibres nerveuses du nerf optique traversent la sclérotique au niveau de la lame criblée. Les tendons des muscles oculomoteurs s'insèrent sur la face externe de la sclérotique.

1.2.2 L'UVÉE

Elle est richement vascularisée. Elle comprend :

* La choroïde

Elle est située entre la sclérotique et la rétine ; mais, elle reste séparée de la rétine par la membrane de BRÜCH.

Elle comporte des mélanocytes, en particulier dans sa couche la plus externe ; ceci permet l'absorption de la lumière qui traverse la rétine. Sa couche moyenne comporte des vaisseaux de passage, artères et veines, qui alimentent la couche choriocapillaire interne. Cette dernière couche est riche en capillaires fenêtrés et a pour rôle essentiel la nutrition des cellules photoréceptrices.

* Le corps ciliaire (Fig 4)

La choroïde se continue dans sa partie antérieure par le corps ciliaire formé par :

- un stroma riche en mélanocytes et en fibres élastiques et comporte des fibres musculaires lisses.
- les procès ciliaires qui sont constitués de franges dont l'axe conjonctif très vascularisé est revêtu de deux couches de cellules cubiques : une couche profonde pigmentée, contenant de nombreux grains de mélanine et séparée du tissu conjonctif par une lame basale. Une couche superficielle non pigmentée, séparée du vitré par une lame basale.

* L'iris (Fig. 4)

C'est un diaphragme dont l'orifice central est la pupille. L'iris est formé par :

- **Une face antérieure** tapissée par une couche discontinue de cellules d'allure fibroblastique.
- **Un stroma** conjonctif qui contient des cellules pigmentaires plus ou moins nombreuses. La couleur des yeux est déterminée par la richesse du stroma irien en cellules mélanocytaires.

Au bord de la pupille se trouvent des fibres musculaires lisses disposées concentriquement formant le muscle sphincter pupillaire ou constricteur de la pupille innervé par le parasymphatique.

- * **Une face postérieure** bordée par 2 couches de cellules épithéliales pigmentées. La couche profonde (du côté du stroma) est en continuité avec la couche pigmentée de l'épithélium ciliaire, elle est formée de cellules myoépithéliales qui envoient des prolongements cytoplasmiques riches en myofilaments formant le **muscle dilateur de la pupille** innervé par le sympathique.

1. 3 LA TUNIQUE SENSORIELLE : LA RÉTINE

Dans ces 2/3 postérieurs, elle est épaisse et constitue la rétine visuelle. À partir de l'**orasserrata**, elle s'amincit brutalement en une double couche de cellules et forme la rétine aveugle qui tapisse successivement les procès ciliaires et la face postérieure de l'iris. La rétine visuelle est constituée de deux feuillets séparés par un espace virtuel, l'espace rétinien. La rétine visuelle est faite :

- **d'un feuillet externe : l'épithélium pigmentaire** qui adhère à la choroïde par l'intermédiaire de la membrane de BRÜCH.
- **d'un feuillet interne**, qui comporte des cellules sensorielles réceptrices, des neurones et des cellules gliales.

1.3.1 LES DIFFÉRENTES COUCHES DE LA RÉTINE (FIG. 5)

La microscopie optique permet d'identifier 10 couches dans la rétine qui sont de l'extérieur vers l'intérieur du globe :

- 1/ La couche pigmentaire formée d'une couche de cellules cubiques pigmentées dont les prolongements apicaux s'insinuent entre les prolongements photosensibles des photorécepteurs. Cet épithélium a un rôle :
 - d'écran noir
 - dans les échanges métaboliques entre les photorécepteurs et la couche chorio-capillaire de la choroïde.
 - dans la phagocytose des reliquats expulsés par les cellules photoréceptrices.
- 2/ La couche des cônes et des bâtonnets
- 3/ La limitante externe
- 4/ La couche granuleuse externe comportant les noyaux des cellules à cônes et à bâtonnets
- 5/ La couche plexiforme externe, constituée par les axones des cellules à cône et à bâtonnets qui font synapses avec les dendrites des cellules bipolaires
- 6/ La couche granuleuse interne comportant les noyaux des cellules bipolaires et des cellules horizontales.
- 7/ La couche plexiforme interne comportant les axones des cellules bipolaires qui font synapses avec les dendrites des cellules multipolaires
- 8/ La couche des cellules ganglionnaires
- 9/ La couche des fibres du nerf optique, ce sont les axones des cellules ganglionnaires
- 10/ La limitante interne

1.3.2 LES PHOTORÉCEPTEURS (FIG. 7)

Ce sont **les cellules à cônes et à bâtonnets**, elles présentent une structure générale très voisine avec :

- une expansion externe
- un corps cellulaire
- une expansion interne

* L'expansion externe

Elle comporte un article interne et un article externe reliés par un cil connectif.

L'article externe contient plusieurs centaines de disques membranaires aplatis empilés les uns sur les autres. Cet article est cylindrique dans les bâtonnets, large à la base et effilé vers le sommet dans les cônes. Les disques membranaires des bâtonnets portent la **rhodopsine** ou pourpre rétinien, ceux des cônes portent l'**iodopsine** ou violet rétinien.

Trois populations de cônes ont été identifiées chez l'homme dont la sensibilité maximale se situe dans le bleu, le vert ou le jaune.

Une concentration de mitochondries se trouve à proximité du cil connectif.

Les disques membranaires se renouvellent en permanence de la base de l'article externe à son sommet. Les disques les plus anciens sont expulsés et phagocytés par les cellules de l'épithélium pigmentaire.

* Le corps cellulaire

Il comporte le noyau des cellules photoréceptrices.

* L'expansion interne

La portion intranucléaire des cellules photoréceptrices émet un prolongement dont l'extrémité est large et aplatie pour les cellules à cônes, et globuleuse pour les cellules à bâtonnets. Les extrémités des bâtonnets se terminent par des **sphérules** creuses où s'articulent 2 à 7 dendrites de cellules bipolaires ; chaque dendrite appartient à une cellule bipolaire différente : chaque bâtonnet fait donc synapse avec plusieurs cellules bipolaires. Les expansions internes des cônes se terminent par

des **pédoncules**. Un pédoncule est plus large qu'une sphérule et fait synapse dans plusieurs invaginations avec des dendrites de cellules bipolaires différentes ainsi qu'avec des prolongements de cellules horizontales.

Les cônes servent à la vision des couleurs et des détails. Les bâtonnets permettent la vision monochromatique en lumière faible (un seul photon peut provoquer une réponse).

1.3.3 LES NEURONES (FIG. 8)

* Les cellules bipolaires

Ce sont des neurones qui connectent les cellules visuelles aux cellules ganglionnaires. Ils ont une expansion externe, le dendrite, en général ramifié dont chaque prolongement gagne une sphérule ou un pédoncule. Leur expansion interne, l'axone, forme des synapses avec les dendrites des cellules ganglionnaires et des cellules amacrine. Ces neurones peuvent contacter plusieurs cellules photoréceptrices (environ 10 près de la macula et 100 en rétine périphérique).

* Les cellules ganglionnaires

Ce sont des cellules multipolaires dont les dendrites et le corps cellulaire reçoivent les terminaisons axonales des cellules bipolaires et des cellules amacrine. Leurs axones amyéliniques se dirigent vers la papille où ils se rassemblent, traversent la lame criblée puis se myélinisent et forment alors le nerf optique. La papille ou point aveugle ne comporte aucun élément photorécepteur.

* Les cellules d'association

Ce sont des cellules utilisant différents types de neurotransmetteurs.

Les cellules horizontales établissent des connexions entre les cellules visuelles au niveau des sphérules et des pédoncules.

Les cellules amacrine établissent des connexions entre les cellules ganglionnaires. Il existe plusieurs types selon le neurotransmetteur utilisé.

Il existe d'autres types de cellules d'association près des cellules ganglionnaires.

1.3.4 LES CELLULES GLIALES

Les astrocytes sont situés dans les couches bipolaires et ganglionnaires.

Les cellules gliales de Müller s'étendent sur toute l'épaisseur du feuillet interne de la rétine et occupent les espaces libres. Elles possèdent des prolongements cytoplasmiques (microvillosités) du côté de l'épithélium pigmentaire.

Des systèmes de jonction accrochent les cellules de Müller entre elles et aux cellules visuelles et forment la limitante externe observable au microscope optique. Les cellules de Müller jouent un rôle de soutien et probablement un rôle équivalent à celui des astrocytes périvasculaires vis-à-vis des neurones. Elles s'étendent jusqu'à la limitante interne.

1.3.5 ZONES PARTICULIÈRES DE LA RÉTINE

La structure de la rétine est modifiée dans certaines zones spécialisées :

La macula ou tache jaune est un champ de couleur jaunâtre (caroténoïdes), d'environ 1,5 mm de diamètre située au milieu du fond de l'œil. En son centre se trouve la fovéa où l'acuité visuelle est la meilleure.

Dans la région fovéale, située dans l'axe visuel de l'œil, la rétine forme une dépression, à ce niveau il n'existe que des cônes. Chaque cône est relié à une cellule bipolaire, elle-même reliée à une cellule ganglionnaire. La fovéa est le point de vision diurne maximale. (Fig. 6)

La papille du nerf optique ou point aveugle : à ce niveau sont rassemblés tous les axones des cellules ganglionnaires qui quittent la rétine.

1.3.6 VASCULARISATION DE LA RÉTINE

L'artère centrale de la rétine, branche de l'artère ophtalmique, émerge au niveau de la papille et irrigue toute la rétine à l'exception de la fovéa.

Elle se ramifie en deux réseaux capillaires communicants :

- un réseau interne dans la couche des cellules ganglionnaires (réseau visible à l'ophtalmoscope).
- Un réseau externe dans la couche des cellules bipolaires et qui s'étend jusqu'à la couche plexiforme externe.

Les cellules visuelles qui ne sont pas directement irriguées par le système précédent sont nourries par la couche choriocapillaire à travers l'épithélium pigmentaire. Les voies veineuses suivent le même trajet que les voies artérielles.

1.4 LES ANNEXES DE L'ŒIL

1.4.1 LES PAUPIÈRES

Les paupières supérieures et inférieures servent à protéger et à humidifier en permanence la cornée. Leurs faces antérieures sont revêtues par une peau mince dont le tissu conjonctif est dense, il comporte **les glandes de Meibomius** :

glandes sébacées qui s'ouvrent sur le bord libre des paupières. La sécrétion lipidique de ces glandes empêche le débordement des larmes et permet l'occlusion totale des paupières. Dans le tissu conjonctif se trouvent des fibres musculaires striées : **muscle orbiculaire** et **muscle releveur de la paupière supérieure**. Leurs faces postérieures sont tapissées d'une muqueuse : la conjonctive palpébrale qui se réfléchit en conjonctive bulbaire au niveau du cul-de-sac conjonctival. Celle-ci recouvre la sclère de la partie antérieure de l'œil. **La conjonctive** est composée d'un épithélium prismatique stratifié. La zone de jonction peau muqueuse correspond au bord libre des paupières et porte les cils.

1.4.2 LES GLANDES LACRYMALES

Elles sont situées dans l'angle osseux supérolatéral, ce sont des glandes séreuses, tubulo-acineuses composées, pourvues de cellules myoépithéliales. La sécrétion lacrymale est riche en sels minéraux et contient des protéines enzymatiques antibactériennes et antivirales (lysozymes). Les larmes sont sécrétées en permanence pour maintenir constamment humide la surface du globe oculaire. L'excès de larme est repris par les canaux lacrymaux qui s'ouvrent dans l'angle interne de l'œil et se terminent dans les fosses nasales.

2. EMBRYOLOGIE DE L'ŒIL

Le globe oculaire et ses annexes ont pour origine l'ectoderme, le neur ectoderme et le mésoderme. Les ébauches oculaires apparaissent très tôt avant la fermeture du neuropore antérieur et se localisent dans le plancher du prosencéphale qui donnera par la suite le plancher du diencéphale (Fig. 9)

2.1 ÉVOLUTION DE L'ECTODERME ET DU NEURECTODERME (Fig. 9)

* FORMATION DES VÉSICULES OPTIQUES PRIMITIVES ET DE LA PLACODE CRISTALLINIENNE

Le futur plancher du diencéphale émet latéralement deux évaginations neur ectodermiques qui s'élargissent en deux vésicules recouvertes par l'ectoderme : ce sont **les vésicules optiques primitives**.

Chaque vésicule primitive induit à son niveau un épaississement de l'ectoderme qui forme **la placode cristallinienne**. Entre la vésicule optique primitive et l'ectoderme, il n'y a pas de mésenchyme.

Le plafond du diencéphale se développe plus rapidement que le plancher ; les vésicules se retrouvent en position ventrale et sont rattachées au diencéphale par les pédicules optiques.

Si des perturbations dans la formation des ébauches oculaires se produisent pendant cette période, on peut aboutir à certaines malformations :

- l'anophtalmie (absence d'un œil)
- la cyclopie (présence d'un seul œil en position centrale)
- la microophtalmie (yeux très petits)

* LA CUPULE OPTIQUE

La vésicule optique primitive va ensuite se déprimer entraînant avec elle la placode cristallinienne, futur cristallin (Fig. 10). La vésicule optique devient **cupule optique** avec :

- un feuillet central (déprimé)
- un feuillet périphérique (paroi externe)

Ces deux feuillets se rapprochent et forment une cupule à double paroi dans laquelle la cavité vésiculaire, en relation avec le diencéphale, se réduit en une **fente rétinienne** qui devient de plus en plus virtuelle.

La cupule s'élargit et se déprime à sa partie ventro-latérale ; cette dépression est appelée **fissure ou fente colobomique** qui se continue sur une partie du pédicule par le sillon ventral.

Les vaisseaux hyaloïdiens, accompagnés de mésenchyme, pénètrent par le sillon ventral dans la fente colobomique puis dans le creux de la cupule. Ces vaisseaux irriguent le feuillet central de la cupule et nourrissent la face postérieure de la vésicule cristallinienne. La fente colobomique se ferme normalement vers le 45^e jour de développement. Un défaut de fermeture de la fissure colobomique entraîne un colobome. Souvent, cette anomalie intéresse seulement la partie antérieure de la fissure colobomique et donne le colobome irien (Fig. 11).

* LE CRISTALLIN (FIG. 10)

La placode cristallinienne ou optique se déprime au fur et à mesure de la formation de la cupule optique, elle forme **la vésicule cristallinienne** qui se détache de l'ectoderme en regard au 35^e jour. L'ectoderme se reforme en avant.

La vésicule cristallinienne comprend :

- un épithélium antérieur cubique simple
- une fente cristallinienne qui disparaît rapidement
- un épithélium postérieur formé de cellules très allongées qui se différencient en fibres cristalliniennes en perdant noyau et organites ; elles acquièrent des protéines fibrillaires parallèles à l'axe cellulaire

- une zone équatoriale, à la jonction des épithéliums antérieur et postérieur comportant des cellules qui prolifèrent jusqu'à l'âge de 20 ans et donnent les fibres cristalliniennes. Les cellules les plus internes sont les plus anciennes.
- La cristalloïde (couche fibreuse entourant le cristallin) et les ligaments suspenseurs dérivent du mésenchyme.

La différenciation des fibres cristalliniennes confère au cristallin sa transparence.

Le cristallin peut rester opaque, ne jamais devenir transparent. Cette malformation relativement fréquente est appelée **cataracte congénitale**. Elle est due à des infections (rubéole...) ou parasitoses (toxoplasmose) survenant au cours de la 1^{re} moitié de la grossesse.

* FORMATION DE LA RÉTINE VISUELLE ET DU NERF OPTIQUE (FIG. 10 -12)

Les neurones se forment par prolifération du neuro-épithélium du feuillet central de la cupule.

Les cellules visuelles sont l'équivalent des cellules épendymaires (elles bordent la fente rétinienne devenue virtuelle, fente continue avec la cavité du diencéphale).

Les cellules bipolaires, horizontales, amacrines, ganglionnaires, de Müller et les astrocytes dérivent du neuro-épithélium.

Les axones des cellules ganglionnaires poussent dans le feuillet central de la cupule puis vers la paroi du pédicule qui borde le sillon ventral ; ils gagnent le diencéphale, après un éventuel croisement de la ligne médiane au niveau du chiasma.

L'épaississement des parois du sillon et du pédicule fait disparaître l'espace mettant en relation la fente rétinienne et la cavité du diencéphale.

La couche périphérique de la cupule reste monocellulaire. Elle se pigmente précocement et forme l'épithélium pigmentaire de la rétine.

Il n'existe pas de jonctions entre cet épithélium et les cellules visuelles. L'ouverture accidentelle de la fente rétinienne est appelée **décollement rétinien** et constitue une urgence ophtalmologique.

2.2 ÉVOLUTION DU MÉSENCHYME (Fig. 13)

Le mésenchyme ne s'interpose entre l'ectoderme et l'ébauche du globe oculaire qu'après séparation du cristallin de l'ectoderme. Il s'agit du mésenchyme céphalique dérivant de la crête neurale.

* LE MÉSENCHYME DE LA CUPULE

Le mésenchyme pénètre dans la cupule en suivant le sillon ventral puis la fissure colobomique et s'interpose entre la cupule et le cristallin. Il constitue l'ébauche du vitré. Il sera peu à peu refoulé autour de l'artère hyaloïdienne par le vitré secondaire fibrillaire, et constituera le ligament de Cloquet qui régresse avant la naissance. La persistance de ce ligament est à l'origine de la **cataracte postérieure**.

* LE MÉSENCHYME PÉRICUPULAIRE

Du tissu mésenchymateux (future leptoménige) se développe autour du futur névraxe et du nerf optique. Il a pour analogue autour du globe oculaire, la future choroïde.

En avant du globe oculaire, le mésenchyme se creuse d'une cavité tapissée d'un épithélium : la chambre antérieure. Ce mésenchyme comporte une partie centrale appelée **membrane pupillaire** qui doit se résorber. Si elle persiste, elle est à l'origine de la **cataracte antérieure**.

Le mésenchyme en continuité avec la dure-mère se différencie pour donner la sclérotique et le stroma cornéen.

L'épithélium postérieur de la cornée est d'origine mésodermique alors que l'épithélium antérieur est d'origine ectodermique. Une déformation de la sphéricité de la cornée donne **l'astigmatisme**.

Dans l'angle iridocornéen, du tissu mésenchymateux peut persister et empêcher la circulation de l'humeur aqueuse et sa résorption ceci est à l'origine du **glaucome congénital**. L'hyperpression liquidienne créée dans le globe oculaire entraîne la dégénérescence du nerf optique.

* FORMATION DE L'IRIS ET DES PROCÈS CILIAIRES (FIG. 13)

Au 3^e mois, le rebord antérieur de la cupule s'accroît et s'insinue en avant du cristallin et en arrière du mésenchyme ; c'est ainsi que se mettent en place les deux couches de l'épithélium postérieur de l'iris. Parallèlement, les procès ciliaires se forment par développement de villosités. L'iris est donc formé :

- d'un épithélium antérieur et d'un stroma (avec le muscle constricteur) d'origine mésodermique,
- d'un épithélium postérieur (avec muscle dilateur) d'origine neur ectodermique.

Les procès ciliaires sont formés d'un épithélium d'origine neur ectodermique, d'un stroma et d'un muscle ciliaire d'origine mésodermique.

2. 3 LES ANNEXES DU GLOBE OCULAIRE (FIG. 13)

* LES PAUPIÈRES

À la 8^e semaine du développement embryonnaire apparaît un bourrelet annulaire de mésenchyme revêtu par l'ectoderme. Ce bourrelet se referme en avant de l'ébauche oculaire. La soudure s'effectue selon une ligne horizontale derrière laquelle se trouve le sac conjonctival ; les bourgeons des cils et les glandes de Meibomius se forment. **La déhiscence palpébrale** s'effectue vers 6^e mois par ouverture de la ligne de soudure.

L'appareil lacrymal

Il se forme à partir de l'ectoderme du sac conjonctival.

Les muscles oculomoteurs

Un déséquilibre dans la position ou de la tonicité de ces muscles provoque des strabismes de différents types.

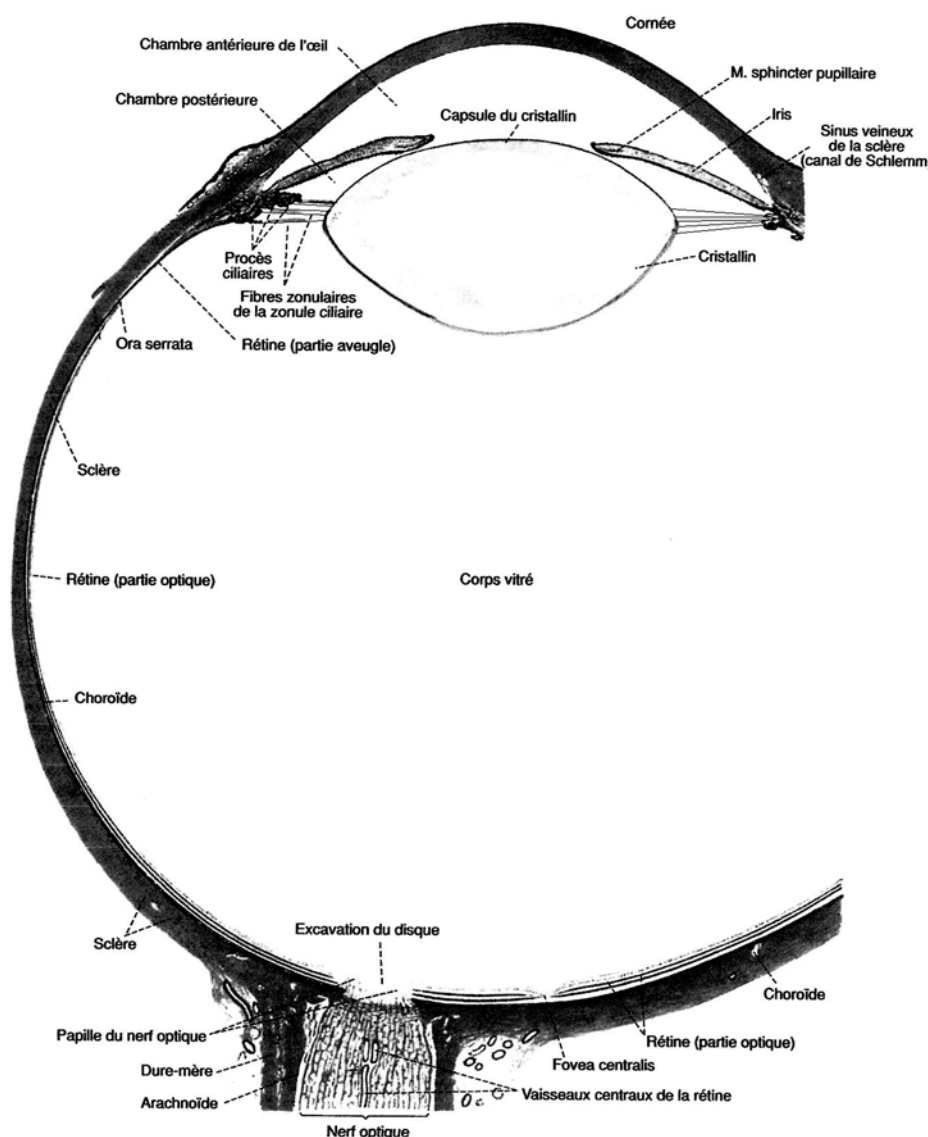


Figure 1: Coupe horizontale du globe oculaire



Figure 2: La Cornée

Figure 3: Le Cristallin

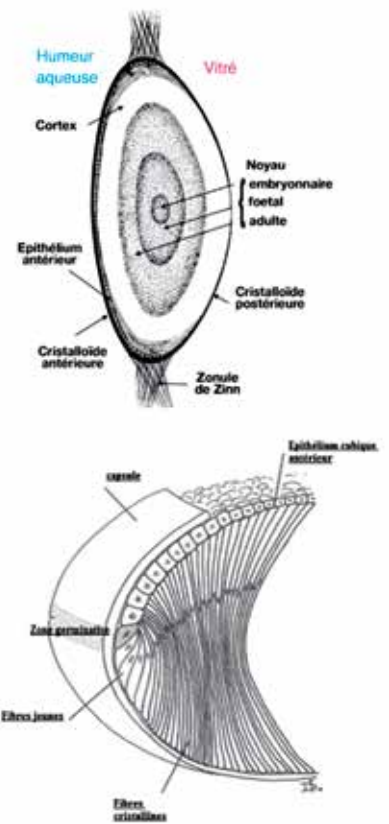
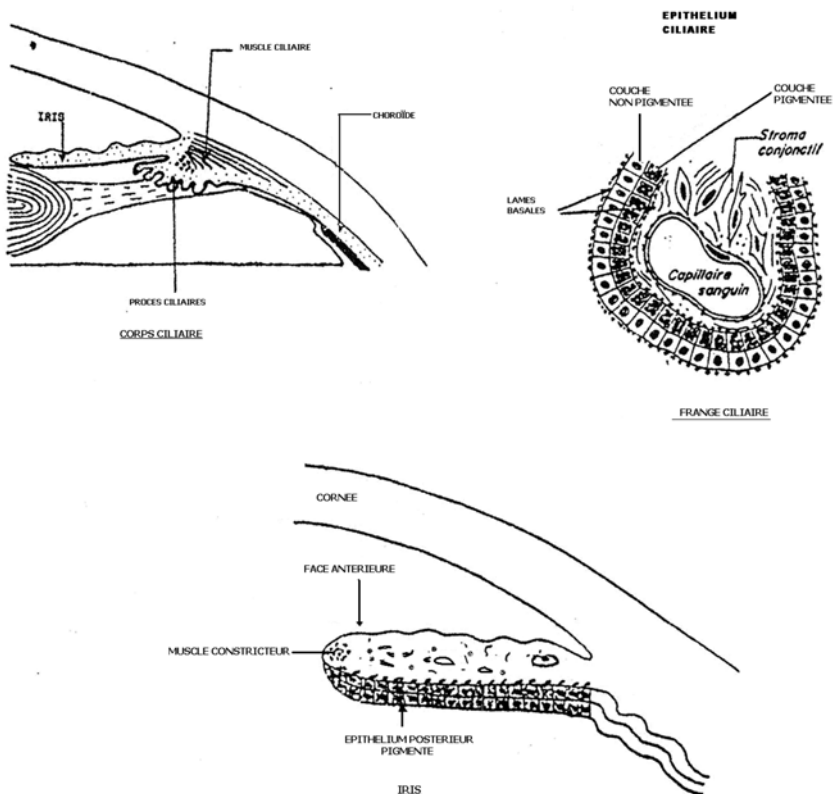


Figure 4: Corps ciliaire et Iris



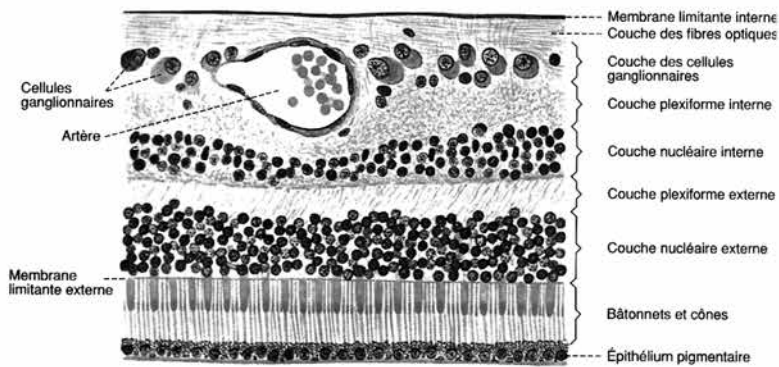


Figure5

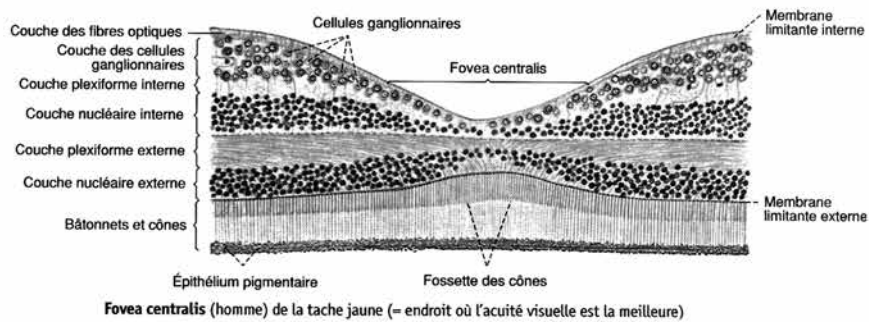


Figure6

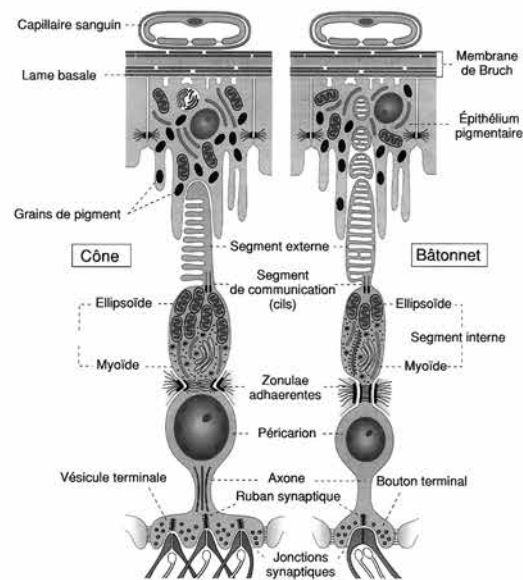
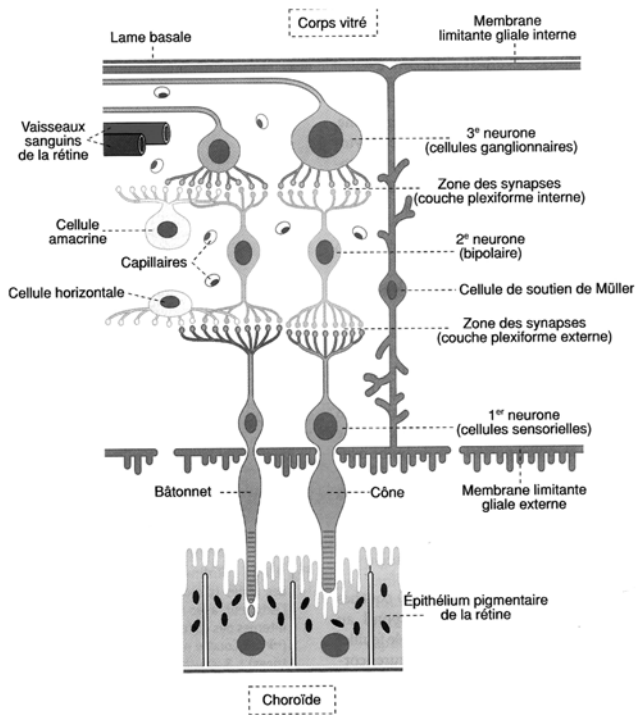
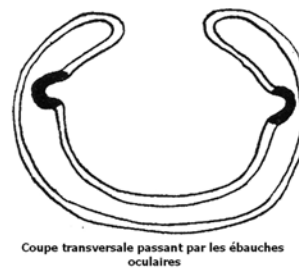
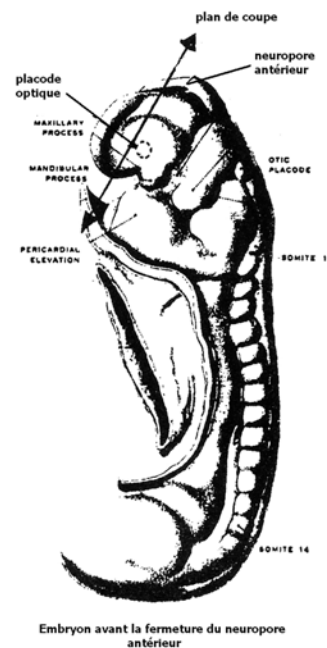


Figure 7

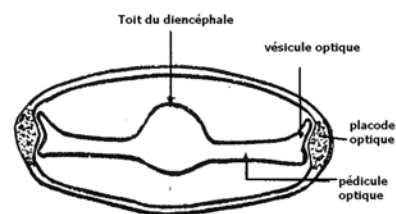


Éléments neuronaux de la rétine (homme), représentation schématique.

Figure 8



Apparition des ébauches oculaires



Coupe transversale après la fermeture du neuropore antérieur. formation des vésicules optiques

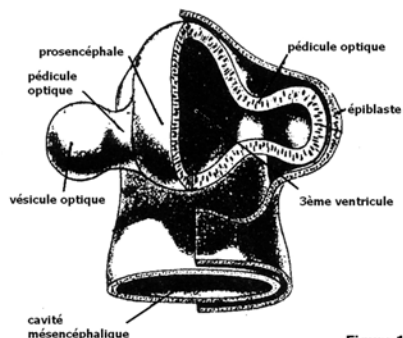
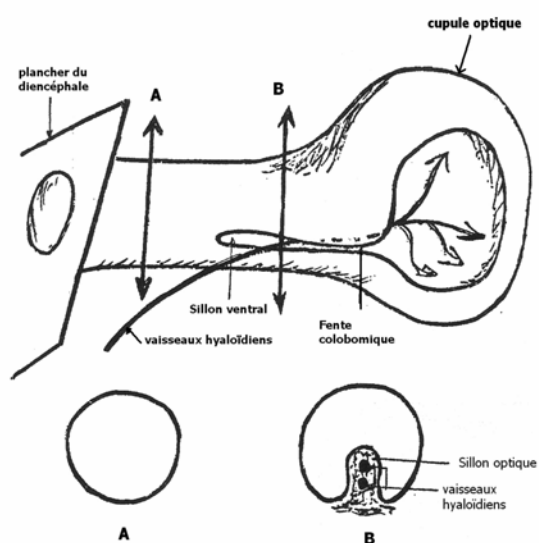
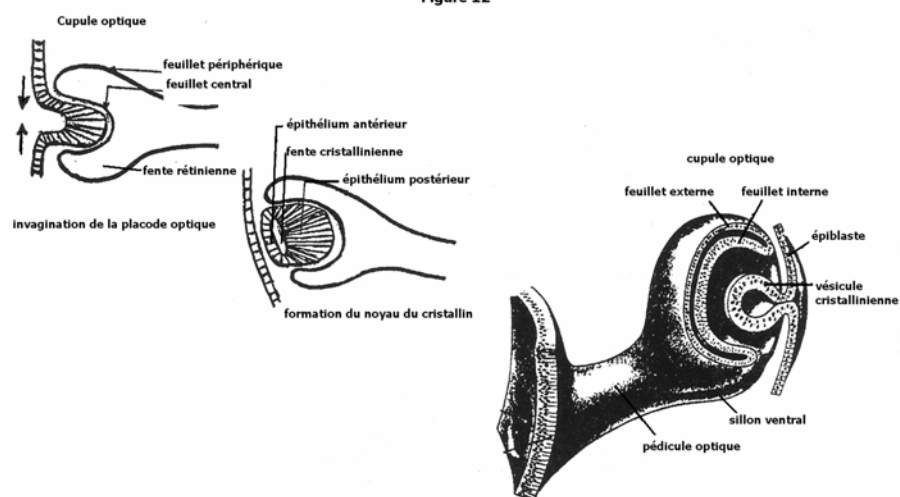


Figure 11

Figure 12



A et B coupes transversales au niveau du futur nerf optique

Formation de la fente colobomique et du sillon ventral

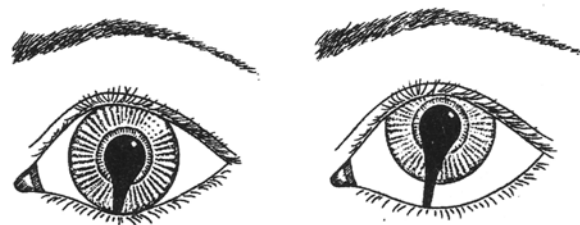


Figure 13: colobome irien

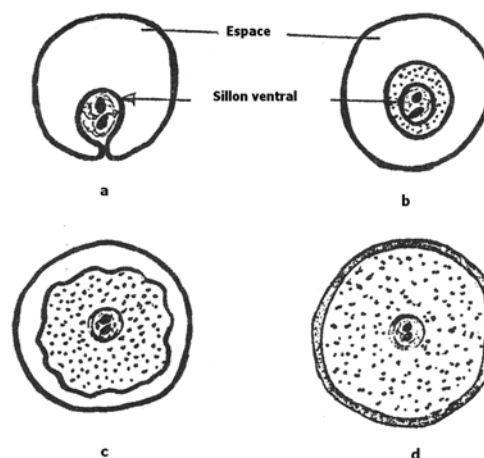


Figure 14: Evolution du nerf optique

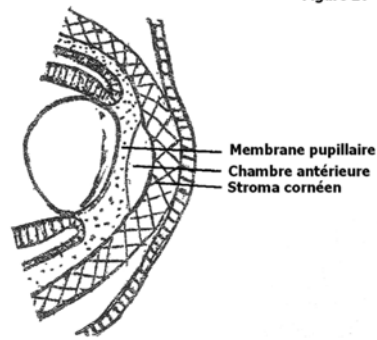
a/ 2 mois

b/ 3 mois

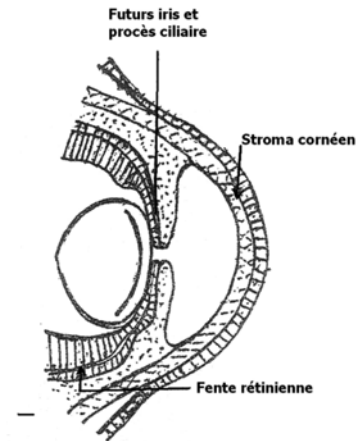
c/ 4 mois

d/ 5 mois: disparition de la communication entre 3ème ventricule et la fente rétinienne

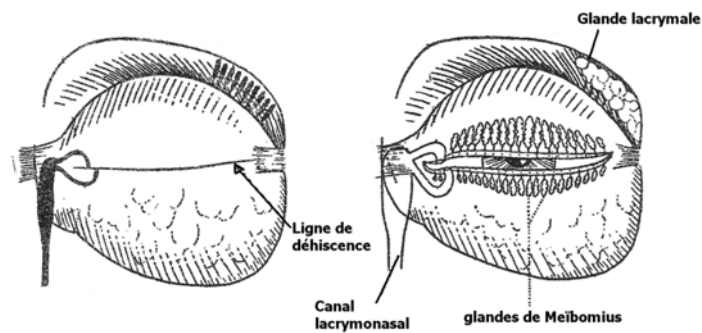
Figure 16



Formation de la membrane pupillaire



Formation de l'iris et des procès ciliaires



Formation des paupières

HISTOLOGIE DE L'OREILLE

L'oreille est divisée en oreille externe, oreille moyenne et oreille interne.

1. L'OREILLE EXTERNE

L'OREILLE EXTERNE COMPORTE LE PAVILLON ET LE CONDUIT AUDITIF EXTERNE. Le pavillon est constitué d'un cartilage élastique recouvert d'une peau. Le conduit auditif externe est revêtu par une peau qui renferme en profondeur des glandes sébacées particulières, **les glandes cérumineuses, sécrétant le cérumen**. Un cartilage élastique, en continuité avec celui du pavillon, entoure les deux tiers externes du conduit ; l'os temporal du crâne entoure le tiers interne.

2. LE TYMPAN

L'OREILLE MOYENNE EST SÉPARÉE DE L'OREILLE EXTERNE PAR LA MEMBRANE TYMPANIQUE

Le tympan sépare le conduit auditif externe de la caisse du tympan ou cavité de l'oreille moyenne.

La membrane tympanique comporte trois couches :

- un épithélium pavimenteux stratifié représente la couche externe ;
- la couche moyenne est composée d'un tissu de soutien fibreux contenant de nombreuses fibres élastiques, assurant les propriétés mécaniques particulières du tympan ;
- enfin un épithélium cubique bas, en continuité avec celui qui revêt le reste de la cavité, forme la couche interne.

3. L'OREILLE MOYENNE

L'OREILLE MOYENNE TRANSMET LES VIBRATIONS DU SON À L'OREILLE INTERNE

La cavité de l'oreille moyenne (caisse tympanique) est limitée par un épithélium cubique bas et contient les 3 osselets de l'audition : le marteau, l'enclume et l'étrier. Ils sont :

- composés d'os compact ;
- associés par des articulations synoviales ;
- recouverts par un épithélium cubique bas identique à celui qui limite l'ensemble de la cavité.

Deux petits muscles squelettiques, le muscle tenseur du tympan et le muscle de l'étrier s'insèrent sur les osselets et modulent les mouvements engendrés par des sons trop intenses.

La caisse tympanique, qui communique directement avec les cavités mastoïdiennes (sinus mastoïdiens), est bordée par un épithélium cubique bas ou pavimenteux simple.

La trompe d'Eustache équilibre la pression dans la cavité de l'oreille moyenne

La trompe d'Eustache s'étend entre la caisse du tympan et le rhinopharynx. Elle est bordée par un épithélium cilié similaire à l'épithélium respiratoire et comporte des glandes muco-sécrétantes. Sa paroi est formée par l'os temporal sur le versant externe, par du cartilage élastique dans la partie suivante et de cartilage hyalin en se rapprochant de l'ouverture dans le rhinopharynx. Sa fonction est d'équilibrer la pression de l'air à l'intérieur de la caisse du tympan avec la pression atmosphérique.

Normalement collabée, la trompe d'Eustache s'ouvre avec les mouvements des muscles du rhinopharynx lors de la déglutition ou du bâillement.

4. L'OREILLE INTERNE

L'OREILLE INTERNE EST UN ENSEMBLE DE SACS REMPLIS DE LIQUIDE ET SITUÉS DANS DES CAVITÉS OSSEUSES

L'oreille interne est un ensemble de sacs liquidiens (labyrinthe membraneux) situés dans des cavités creusées dans l'os temporal du crâne (labyrinthe osseux).

Le labyrinthe membraneux qui comprend le canal cochléaire, le saccule, l'utricule, les canaux semi-circulaires, le canal et le sac endolymphatique, est bordé d'une gaine de tissu fibreux tapissée par un épithélium pavimenteux simple. Il est rempli d'un liquide, l'endolymphe, et porte des récepteurs sensoriels épithéliaux spécialisés lui permettant de détecter les sons

et la position. Le **labyrinthe osseux** composé de trois cavités – le vestibule, les canaux semi-circulaires et la cochlée – est bordé d'endoste et rempli de liquide, la périlymphe.

LE MOUVEMENT EST DÉTECTÉ PAR LES MÉCANORÉCEPTEURS DE L'OREILLE INTERNE

Les mécanorécepteurs ou **cellules sensorielles** sont des cellules épithéliales spécialisées présentant un système très organisé de microvillosités (stéréocils) au pôle apical.

La déflexion microvillositaire dépolarise la membrane plasmique des cellules sensorielles ; l'influx est ensuite transmis au système nerveux central via des fibres nerveuses.

Les cellules sensorielles se regroupent en amas localisés sur trois sites :

- dans les ampoules des canaux semi-circulaires de l'appareil vestibulaire pour détecter les accélérations ;
- dans les macules de l'utricule et du saccule pour percevoir la pesanteur et la position statique ;
- dans l'organe de Corti de la cochlée pour percevoir les vibrations sonores.

Dans chaque site, les microvillosités des cellules sensorielles sont incluses dans une matrice gélatineuse qui est déplacée par un stimulus donné. Les mouvements des microvillosités vers leurs plus hauts rangs dépolarisent la membrane plasmique (excitation) tandis que les mouvements vers leurs rangs les plus courts provoquent une hyperpolarisation (inhibition).

Les cellules de soutien qui entourent les cellules sensorielles leur sont attachées par des jonctions serrées apicales. Ces jonctions maintiennent un gradient ionique entre l'endolymphe et le liquide extracellulaire qui s'inverse lors de la dépolarisation.

LA PESANTEUR ET LA POSITION STATIQUE SONT DÉTECTÉES PAR LES CELLULES SENSORIELLES DES MACULES DE L'UTRICULE ET DU SACCULE

La macula de l'utricule siège dans le plan horizontal tandis que la macula du saccule siège dans le plan vertical, à angle droit avec la **macula de l'utricule**. Toutes les macules sont histologiquement identiques et composées de trois types cellulaires suivants :

- Cellules de soutien, cylindriques avec de courtes microvillosités apicales ;
- Cellules sensorielles de type I, polygonales et entourées par un réseau de terminaisons nerveuses afférentes et efférentes ;
- Cellules sensorielles de type II, cylindriques et dont les pôles basaux font synapse avec des terminaisons nerveuses afférentes et efférentes.

La surface apicale des cellules sensorielles comporte de grandes microvillosités (en tuyaux d'orgue) constituant les **stéréocils** et compote aussi une véritable structure ciliaire unique appelée **kinétocil** localisée juste en arrière de la région des plus grandes microvillosités.

Les stéréocils et le kinétocil de chaque cellule sensorielle sont inclus dans la plaque gélatineuse de matrice extracellulaire appelée **membrane otolithique** qui est suspendue dans l'endolymphe. Cette membrane est couverte de nombreuses petites particules composées de protéines et de carbonate de calcium, **les otolithes**.

La macula peut détecter la direction de la pesanteur grâce à la sensibilité des cellules sensorielles aux déplacements de la membrane otolithique qui les recouvrent, ces déplacements résultant des mouvements de la tête, d'avant en arrière (macula de l'utricule) et sur les côtés (macula du saccule).

L'ACCÉLÉRATION ET LE MOUVEMENT SONT DÉTECTÉS PAR LES CELLULES SENSORIELLES DES AMPOULES DES CANAUX SEMI-CIRCULAIRES.

Il existe trois canaux semi-circulaires, en positions postérieure, supérieure et horizontale.

Chaque ampoule, qui est une région dilatée du labyrinthe membraneux, contient des amas de cellules sensorielles disposées dans des structures digitiformes appelées **crêtes ampullaires**. Les stéréocils des cellules sensorielles sont enserrés dans une matrice gélatineuse en forme de dôme appelée **cupule**.

Lors de la rotation de la tête, l'endolymphe se déplace dans le labyrinthe membraneux. Ainsi les mouvements déplacent la cupule et la direction et la direction de ce déplacement est détectée par les cellules sensorielles.

L'intégration des perceptions des trois canaux semi-circulaires situés dans des plans perpendiculaires produit l'information sur la direction et la vitesse d'accélération du mouvement de la tête.

LE SON EST DÉTECTÉ DANS L'OREILLE INTERNE PAR L'ORGANE DE CORTI SITUÉ DANS LE CANAL COCHLÉAIRE.

La cochlée creusée dans l'os temporal contient trois espaces : **la rampe vestibulaire, le canal cochléaire et la rampe tympanique**. Ces espaces ont un trajet en spirale. La spirale osseuse interne à la cochlée est appelée **columelle**.

La rampe vestibulaire et la rampe tympanique contiennent de **la périlymphe** qui communique avec la périlymphe du vestibule. Le canal cochléaire est rempli d'**endolymphe** qui se trouve dans le labyrinthe membraneux.

Au sommet de la cochlée, les rampes vestibulaire et tympanique communiquent par un orifice appelé **l'hélicotreme**.

Le nerf cochléaire émerge de la base de la cochlée et amène les signaux au cerveau.

La membrane vestibulaire, appelée membrane de Reissner, sépare la rampe vestibulaire du canal cochléaire. Elle est constituée de 2 couches d'épithélium pavimenteux séparées par une lame basale : l'un des épithéliums se poursuit par les cellules bordant la rampe vestibulaire, l'autre par les cellules bordant le canal cochléaire. La cohésion cellulaire est assurée par des jonctions serrées bien développées qui permettent de conserver une différence de concentration électrolytique entre l'endolymphe et la périlymphe.

La strie vasculaire, zone spécialisée de la paroi latérale du canal cochléaire, est un épithélium qui présente la particularité de contenir un riche réseau vasculaire. Cette strie vasculaire est responsable de la sécrétion de l'endolymphe.

La membrane basilaire sépare le canal cochléaire de la rampe tympanique. Elle est plus épaisse que la membrane vestibulaire. Elle comporte des fibres de collagène. Sur un côté, elle est recouverte par les cellules bordant la rampe tympanique, sur l'autre par les cellules spécialisées bordant le canal cochléaire. Elle soutient l'organe de Corti formé de cellules de soutien et de cellules spécialisées.

L'organe de Corti est soutenu par un éperon osseux appelé **lame spirale osseuse**. Latéralement, la membrane basilaire est attachée au **ligament spiral** qui adhère à l'endoste. Les neurones du ganglion spiral suivent la lame spirale osseuse.

L'organe de Corti comporte 2 groupes de cellules sensorielles, un groupe interne et un groupe externe, séparés par un petit espace situé à l'extrémité de la lame spirale osseuse, le **tunnel de Corti**. Les cellules du groupe interne sont plus petites que celles du groupe externe qui sont plus grandes, se disposant en trois à cinq rangées parallèles. Les **cellules sensorielles internes** sont complètement entourées par des cellules de soutien épithéliales tandis que les **cellules sensorielles externes** ne sont entourées par les cellules de soutien qu'à leurs extrémités apicale et basale, laissant découverte la zone moyenne qui est ainsi en contact avec le liquide extracellulaire.

Les microvillosités des cellules sensorielles externes sont attachées par des filaments protéiques à un feuillet de matrice extracellulaire gélatineuse appelée **membranatectoria** ; Celles des cellules sensorielles internes restent libres. La membranatectoria est sécrétée par des cellules épithéliales.

Il existe plusieurs types de cellules de soutien dans l'organe de Corti. Les **cellules piliers**, qui soutiennent une cavité triangulaire le tunnel de Corti au niveau du rebord de la lame spirale osseuse. Les **cellules de soutien de type phalangé (cellules de Deiters)** soutiennent les cellules sensorielles externes par des phalanges.

DÉTECTION DU SON PAR L'OREILLE INTERNE

Les ondes sonores font vibrer le tympan et la vibration est transmise à la membrane de la fenêtre ovale par les osselets. Les modifications de pression de la périlymphe ainsi générées atteignent la rampe vestibulaire et mettent en mouvement les membranes vestibulaire et basilaire vers la rampe tympanique, avant de dissiper par la fenêtre ronde.

La membrane tectoria reste relativement rigide et le mouvement des membranes vestibulaire et basilaire entraîne les stéréocils des cellules sensorielles, ce qui provoque la dépolarisation membranaire.

Le signal est transmis par les fibres sensorielles au ganglion spiral d'abord, puis par le nerf cochléaire au cerveau qui le perçoit comme un son.

Les sons de basse fréquence (graves) sont détectés par les stéréocils de l'apex cochléaire, tandis que les sons de haute fréquence (aigus) sont détectés dans la région de la base.

DÉVELOPPEMENT EMBRYOLOGIQUE NORMAL DE L'OREILLE

L'origine embryologique de l'oreille fait appel aux 3 feuillets fondamentaux : l'ectoderme, le mésoderme et l'endoderme.

- Les oreilles externe et moyenne proviennent des constituants des premier et second arcs branchiaux ainsi que des premières poches ecto et entobranchediales.
- L'oreille interne se développe à partir d'**une placode otique** qui est un épaississement de l'ectoderme superficiel qui apparaît près du rhombencéphale vers la fin de la troisième semaine.

Au cours de la quatrième semaine, cette placode otique s'invagine et s'isole pour constituer **une vésicule otique** entourée de mésenchyme céphalique. Cette vésicule se différencie rapidement en trois portions :

- une dorsale, grêle, le canal et le sac endolymphatique,
- une partie centrale, dilatée, l'utricule,
- et une ventrale, effilée, le saccule.

De la quatrième à la septième semaine, l'utricule se transforme et présente trois canaux semi-circulaires, alors que l'extrémité ventrale du saccule s'allonge et s'enroule pour constituer la cochlée. Tous les dérivés de la vésicule otique sont rassemblés sous le nom de labyrinthe membraneux. La placode otique est également à l'origine des ganglions sensoriels du nerf vestibulo-cochléaire.

Des semaines 9 à 23, la condensation mésenchymateuse qui entoure le labyrinthe membraneux (capsule otique), se chondrifie puis s'ossifie pour former le labyrinthe osseux.

La 1^{re} poche entobranchiale s'allonge pour devenir **le recessus tubo-tympanique** qui se différencie en caisse du tympan et trompe d'Eustache. Les cartilages des premiers et seconds arcs branchiaux donnent les trois osselets de l'oreille. Ces osselets ne se développent pas dans la caisse du tympan, mais dans le mésenchyme adjacent. La caisse du tympan s'étend au cours du dernier mois de la gestation pour englober les osselets. De ce fait, les osselets sont tapissés par l'épithélium dérivé de l'endoderme et qui recouvre la caisse du tympan.

Le pavillon de l'oreille se constitue à partir de **six bourgeons auriculaires** qui apparaissent au cours de la 6^e semaine, en regard des premier et second arcs branchiaux.

La première poche ectobranchiale s'allonge pour devenir l'ébauche du conduit auditif externe. Cependant, l'ectoderme qui borde celui-ci prolifère secondairement pour former **un bouchon méatal** qui remplit complètement la portion interne du conduit. Les deux tiers internes du conduit auditif se constituent par recanalisation de ce bouchon au cours de la 26^e semaine.

Le tympan est une structure à 3 feuillets qui dérivent respectivement de l'ectoderme pour l'interne, mésodermique pour l'intermédiaire et endodermique pour l'externe.

MALFORMATIONS CONGÉNITALES DE L'OREILLE

À peu près la moitié de toutes les surdités ont des causes génétiques, l'autre moitié est attribuée à des facteurs environnementaux. Ces derniers comprennent des infections virales in utero (par exemple à cytomégalovirus et par le virus de la rubéole) et l'exposition néonatale à des antibiotiques aminoglycosides (par exemple : la gentamycine).

Les malformations congénitales peuvent toucher les différentes parties de l'oreille :

Les malformations de l'oreille interne : la surdité neurosensorielle et une perturbation de l'équilibration peuvent résulter de diverses malformations structurelles ou d'un mauvais fonctionnement des structures de l'oreille interne, notamment des systèmes cochléaire et vestibulaire. Ces **dysplasies vestibulo-cochléaires** peuvent varier d'une absence complète du labyrinthe membraneux (**aplasie labyrinthique**) à une absence partielle ou un développement incomplet de structures spécifiques de l'oreille interne comme la cochlée (**hypoplasie cochléaire**). Par ailleurs, une perte d'audition peut également résulter de dysplasies plus subtiles n'affectant qu'un seul type cellulaire (par exemple une perturbation de l'organisation des stéréocils).

- Les malformations de l'oreille externe (surdité de conduction) : les malformations de l'oreille externe (par exemple du **pavillon** résultent d'une croissance et d'une morphogenèse anormales d'un ou plusieurs renflements auriculaires. Un arrêt de croissance de tous les renflements entraîne une **microtie** (petite auricule) ou une **anotie** (absence d'auricule). Une croissance excessive des renflements engendre une macrotie (grande auricule). Les malformations du conduit auditif externe comprennent l'atrésie et la **sténose**.
- Les malformations de l'oreille moyenne (surdité de conduction) d'une formation ou d'une ossification anormale des osselets de l'ouïe, dérivés des cellules de la crête neurale. Un arrêt de croissance de cette population cellulaire engendre une **hypoplasie**, une **aplasie** ou une **fixation ossiculaire**.

La perte de l'audition et la surdité dues à des causes génétiques peuvent se présenter comme une anomalie isolée ou **syndromique**, c'est-à-dire être associée à d'autres anomalies.

LA MUQUEUSE OLFACTIVE

La muqueuse olfactive est située au niveau du toit des fosses nasales au contact de la lame criblée de l'éthmoïde. Elle est constituée d'un épithélium olfactif et d'un chorion.

L'épithélium olfactif contient 4 types de cellules :

- Des cellules basales
- Des neurones olfactifs immatures ou en différenciation
- Des neurones olfactifs matures (neurones bipolaires)
- Des cellules de soutien ou cellules sus-tentaculaires.

Les cellules basales sont mitotiquement actives, produisant des cellules filles qui se différencient d'abord en neurones olfactifs immatures puis en neurones olfactifs matures. **Les neurones olfactifs continuent de proliférer chez l'adulte**. La durée de vie d'un neurone olfactif primaire est d'environ 30 à 60 jours.

Le neurone olfactif est une cellule hautement polarisée. Sa région apicale en regard de la surface de la muqueuse forme une terminaison renflée munie de **cils modifiés**. La région basale donne naissance à un prolongement axonique. Plusieurs axones, provenant des neurones olfactifs primaires, traversent la lame criblée de l'éthmoïde et entrent en contact avec des neurones du bulbe olfactif pour établir des connexions synaptiques.

Les glandes olfactives appelées **glandes de Bowman**, situées au niveau du chorion, sécrètent un fluide séreux dans lequel les substances odorantes se dissolvent. Le fluide sécrétoire contient une protéine de liaison aux odeurs (**odorant-binding protein, OBP**) ayant une grande affinité de liaison pour de nombreuses molécules odorantes. L'OBP transporte les odeurs vers les récepteurs présents à la surface des cils modifiés et les élimine après qu'elles ont été senties. De plus, le produit de sécrétion des glandes de Bowman contient des substances protectrices comme le lysozyme et les immunoglobulines A (IgA, sécrétées par les plasmocytes).

LES BOURGEONS DU GOÛT

Ce sont des organes chémorécepteurs capteurs des sensations gustatives. Ils sont situés principalement dans le vallum des papilles caliciformes (au niveau du V lingual), mais aussi dans les papilles fongiformes et dans l'épithélium du palais, de l'épiglotte et du pharynx.

Ils se présentent sous forme de petits tonneaux clairs. Chaque bourgeon du goût renferme un ensemble de cellules dont l'extrémité apicale étroite se termine dans un **pore gustatif**. Un bourgeon du goût possède trois composants cellulaires :

- Des cellules réceptrices du goût,
- Des cellules de soutien (ou cellules du goût immatures)
- Des cellules précurseurs (ou cellules basales)

Les cellules réceptrices du goût ont une durée de vie de 10 à 14 jours. Les cellules précurseurs donnent naissance aux cellules de soutien qui à leur tour, se transforment en cellules du goût matures. La partie basale d'une cellule réceptrice du goût est en contact avec une terminaison nerveuse afférente provenant des neurones des ganglions sensoriels des nerfs facial, glosso-pharyngien et vague.

Le sucré, l'acide, l'amer et le salé sont les quatre perceptions gustatives classiques.

Le goût est déclenché lorsque des substances chimiques solubles, appelées **substances gustatives** diffusent à travers le pore gustatif et interagissent avec les sous unités alpha, bêta, et delta de la protéine G liées aux récepteurs gustatifs présents dans **les microvillosités apicales des cellules réceptrices du goût**.

Certaines cellules réceptrices du goût ne réagissent qu'à l'une des substances gustatives de base. D'autres sont sensibles à plusieurs goûts.

LES TERMINAISONS NERVEUSES SENSITIVES

Les terminaisons nerveuses sensibles sont les arborisations terminales des dendrites de neurones dont le corps cellulaire est situé dans les ganglions des nerfs mixtes crâniens ou rachidiens.

Elles sont soit encapsulées soit libres intraépidermiques ou intradermiques

1. LES TERMINAISONS ENCAPSULÉES

1.1 LE CORPUSCULE DE MEISSNER

Il est ovalaire et mesure environ 120 micromètres. Il se trouve dans le derme, allongé dans le grand axe des papilles dermiques de la paume des mains, du bout des doigts, des lèvres, de la plante des pieds et des orteils. Il comporte :

Des cellules aplaties, qui correspondent à des cellules de Schwann modifiées, empilées les unes sur les autres et disposées perpendiculairement au grand axe du corpuscule.

Une dendrite ramifiée qui s'enroule en spirale entre les cellules. La dendrite sort du corpuscule par son pôle basal et acquiert une gaine de myéline.

Le corpuscule de Meissner est impliqué dans la sensibilité tactile fine.

1.2 LE CORPUSCULE DE PACINI

Il est situé principalement dans le derme profond ou l'hypoderme. On peut le trouver au niveau de certains organes tels le mésentère, le pancréas.

Il est souvent de forme ovalaire. Son grand axe peut atteindre 2 mm de grand axe.

Il est encapsulé et comporte des cellules très aplaties à disposition concentrique en bulbe d'oignon séparées par une mince couche de tissu conjonctif. Chaque corpuscule comporte en son centre une ou plusieurs fibres amyéliniques. La fibre nerveuse acquiert une gaine de myéline à sa sortie du corpuscule.

Le corpuscule est sensible à la pression profonde, à la vibration et à la tension.

1.3 LES AUTRES CORPUSCULES

Des corpuscules semblables aux deux précédents, mais de plus petites tailles sont situés dans le derme. Ils recueillent des stimuli particuliers :

- Le corpuscule de Krause (sensible à la tension)
- Le corpuscule de Ruffini (sensible à l'extension)
- Le corpuscule de Golgi Manzonni (sensible aux vibrations de haute fréquence)

2. LES TERMINAISONS LIBRES

2.1 LES TERMINAISONS LIBRES ÉPIDERMIQUES

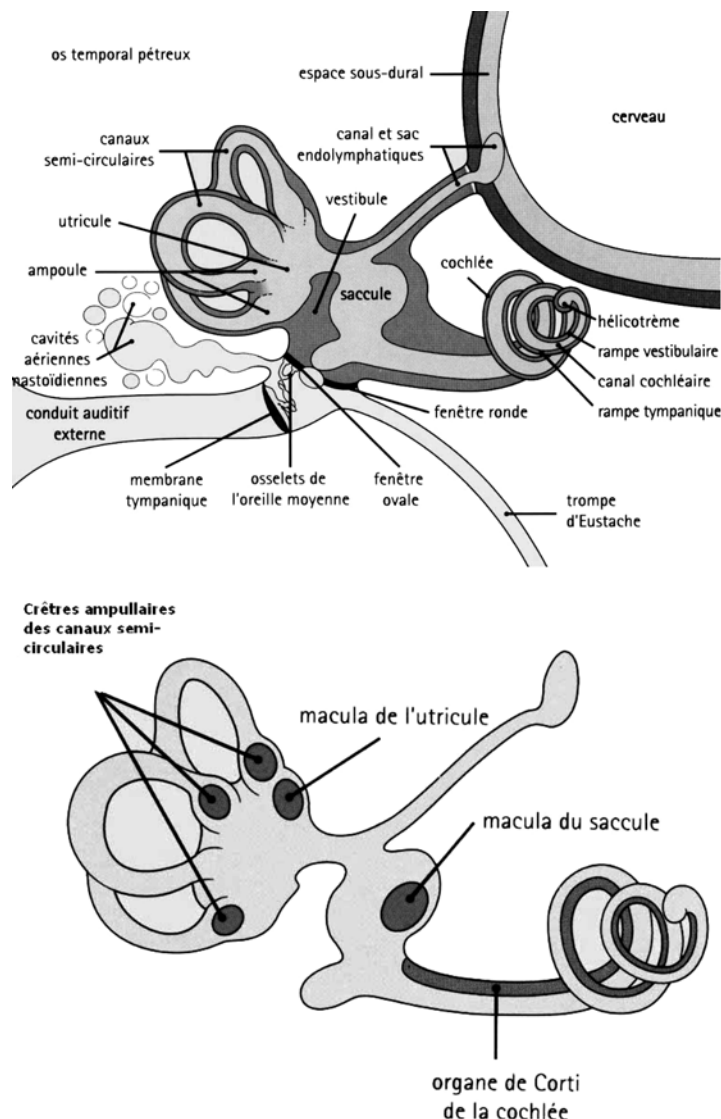
Ce sont des dendrites appartenant à des cellules ganglionnaires des ganglions crâniens ou rachidiens. Dans l'épiderme, chaque dendrite est entourée de kératinocytes. Dans le derme, les dendrites sont entourées de cellules de Schwann. Ces terminaisons sont sensibles à la douleur et à la température.

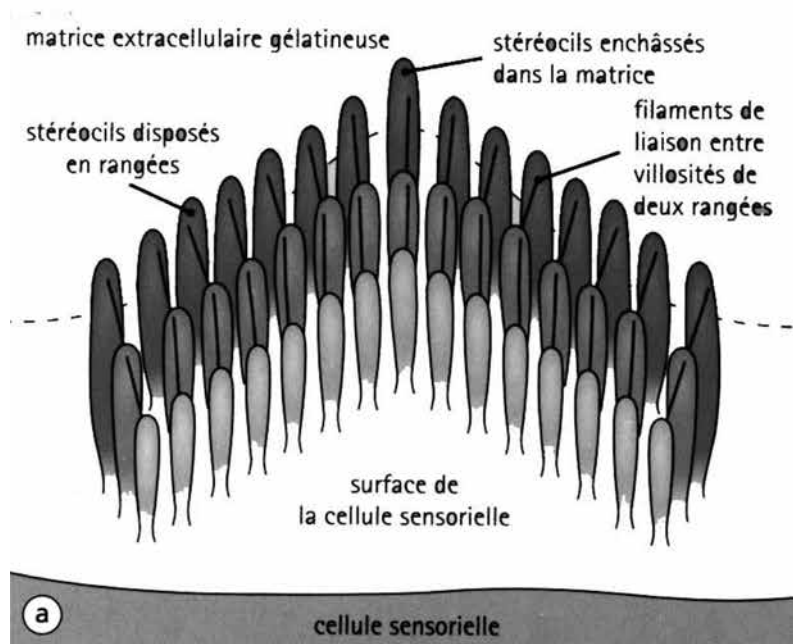
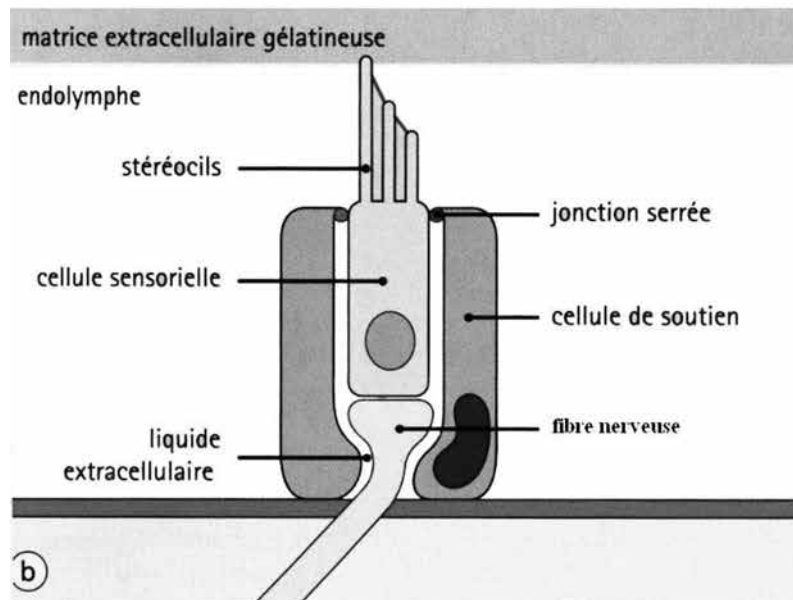
2.2 LE COMPLEXE DE MERKEL (À LA BASE DE L'ÉPIDERME)

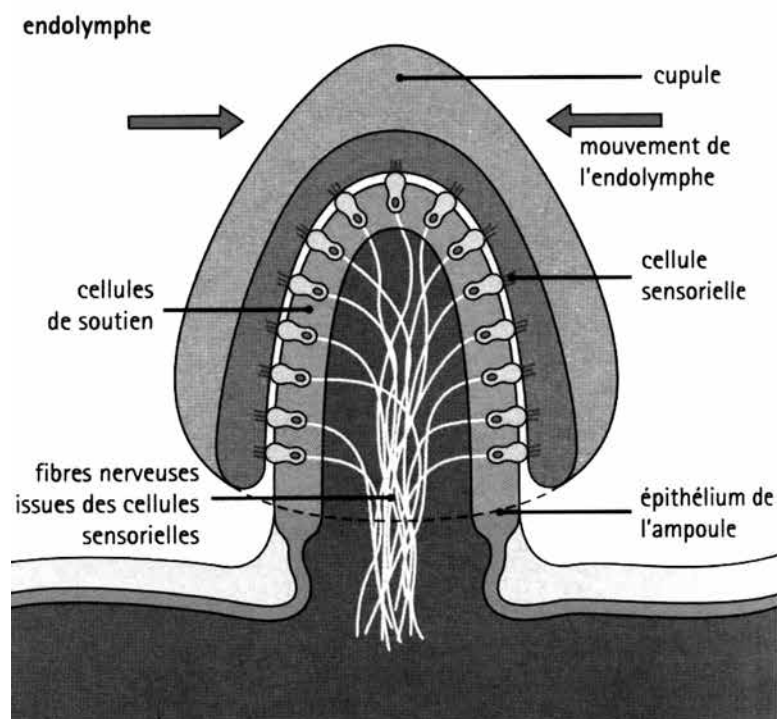
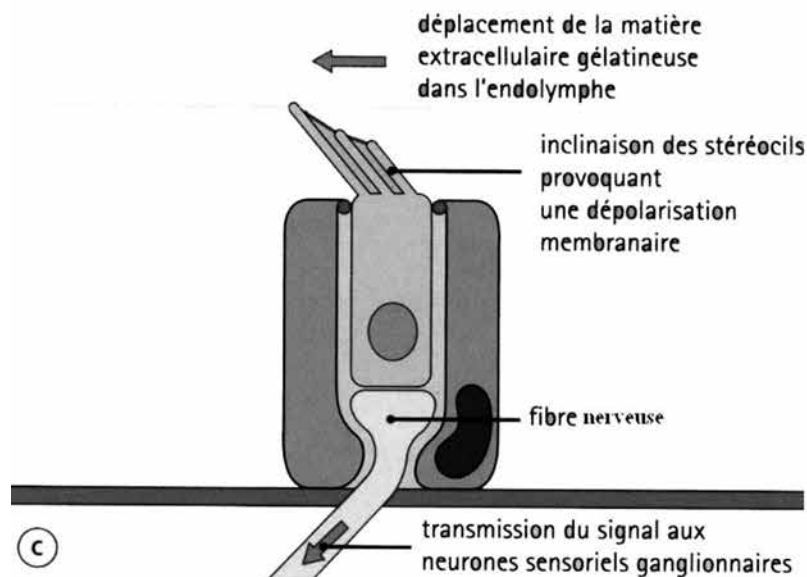
Ce complexe est formé par une terminaison dendritique et une cellule différenciée de la couche germinative de l'épiderme appelée cellule de Merkel. Cette cellule contient des grains éosinophiles et fait synapse avec la dendrite. Les complexes de Merkel sont regroupés par endroits. Ce sont des récepteurs tactiles.

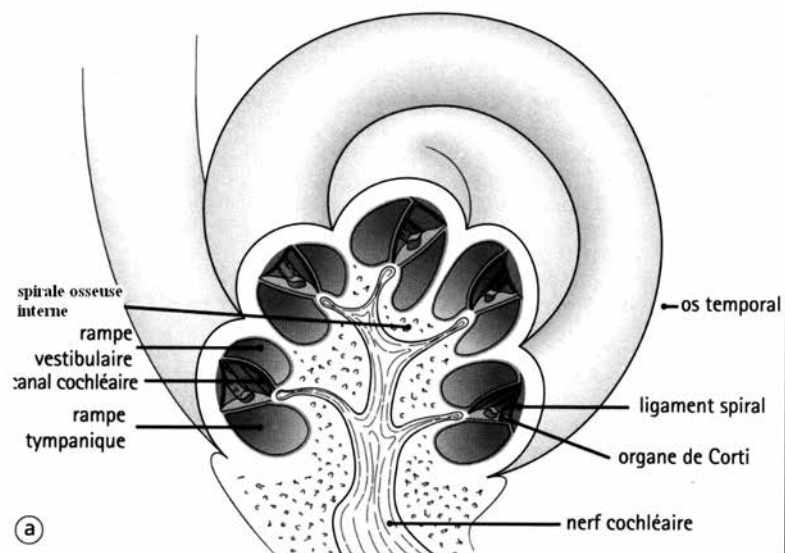
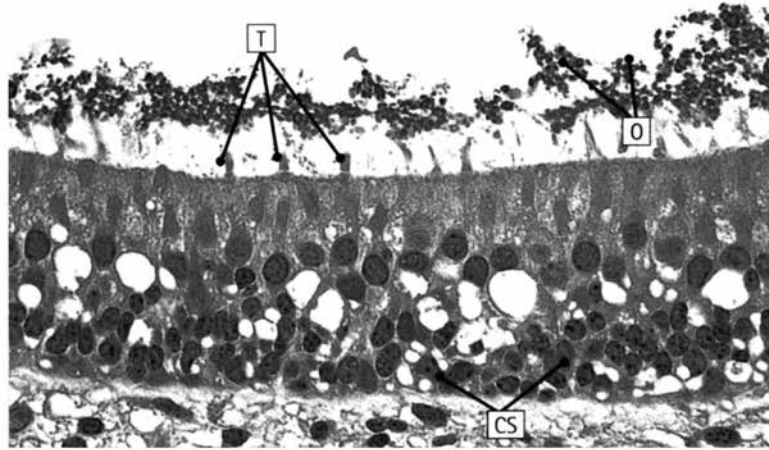
2.3 LES TERMINAISONS LIBRES DERMiques

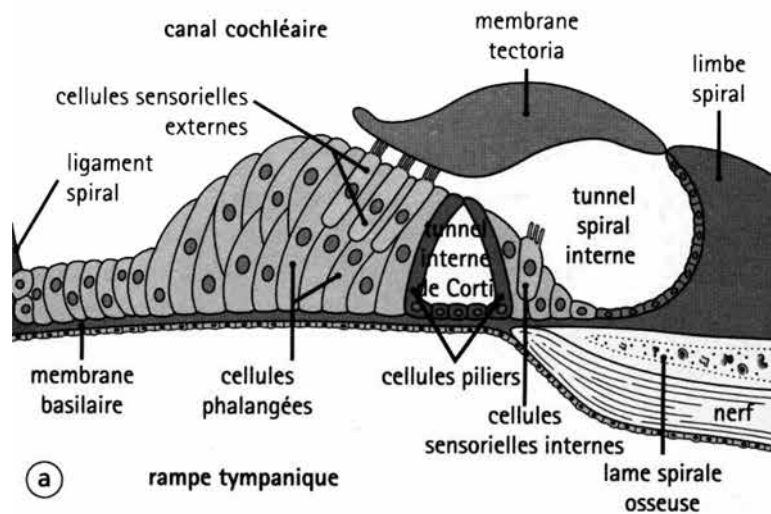
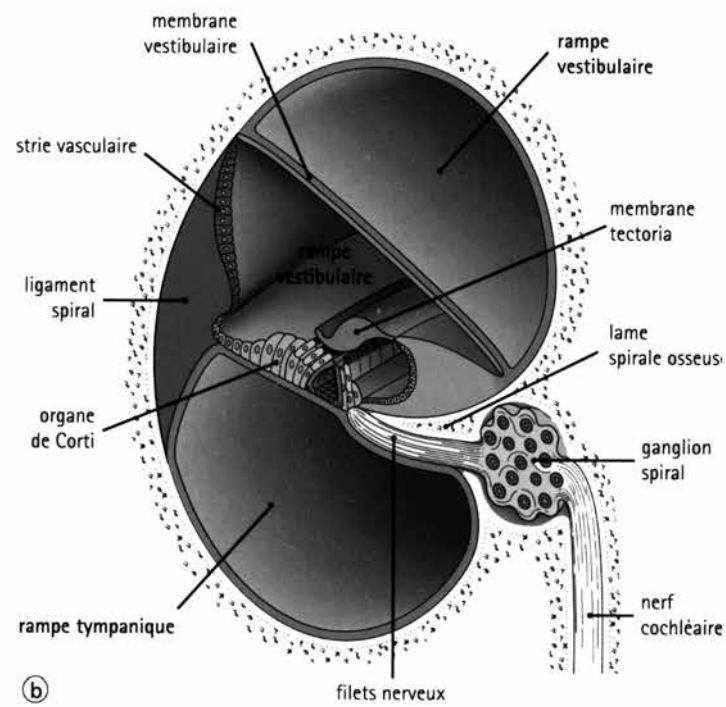
- **Le réseau de Ruffini** : c'est un ensemble de fibres amyéliniques situé à l'union du derme papillaire et du derme moyen.
- **Les anses de Dogiel** : c'est un ensemble de fibres amyéliniques qui partent du réseau de Ruffini et forment des anses au niveau du derme papillaire.

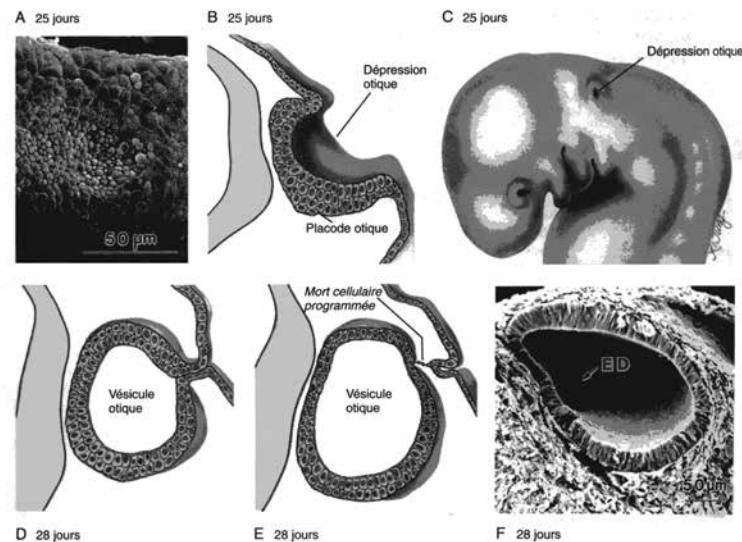




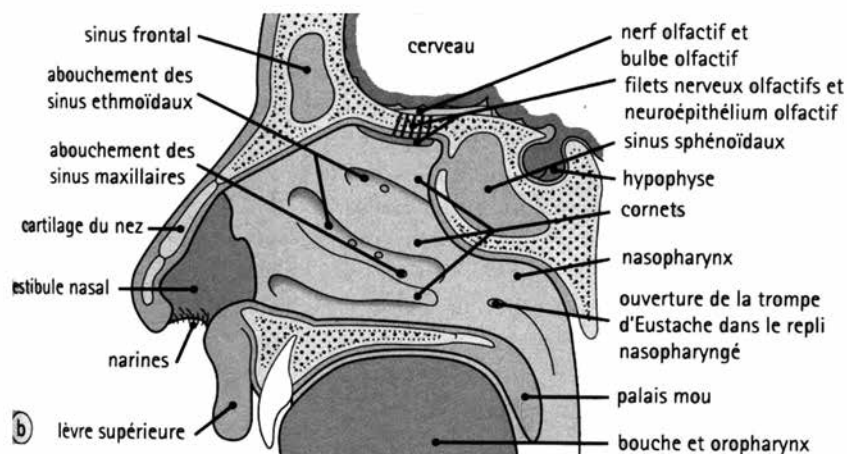


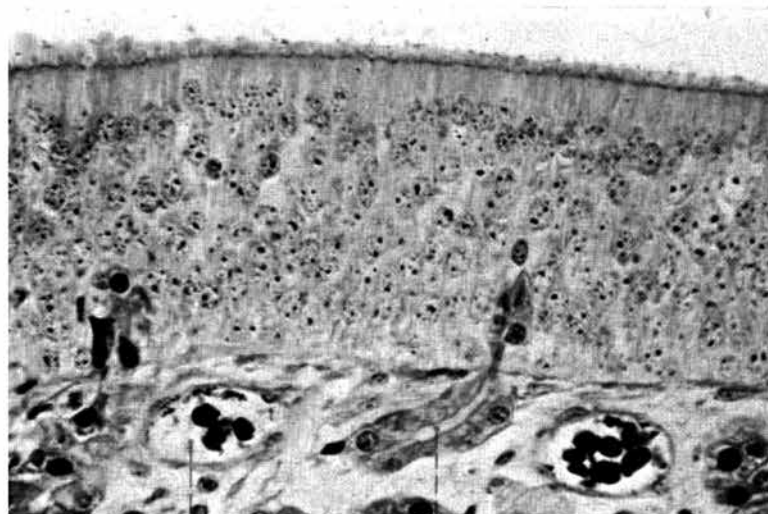
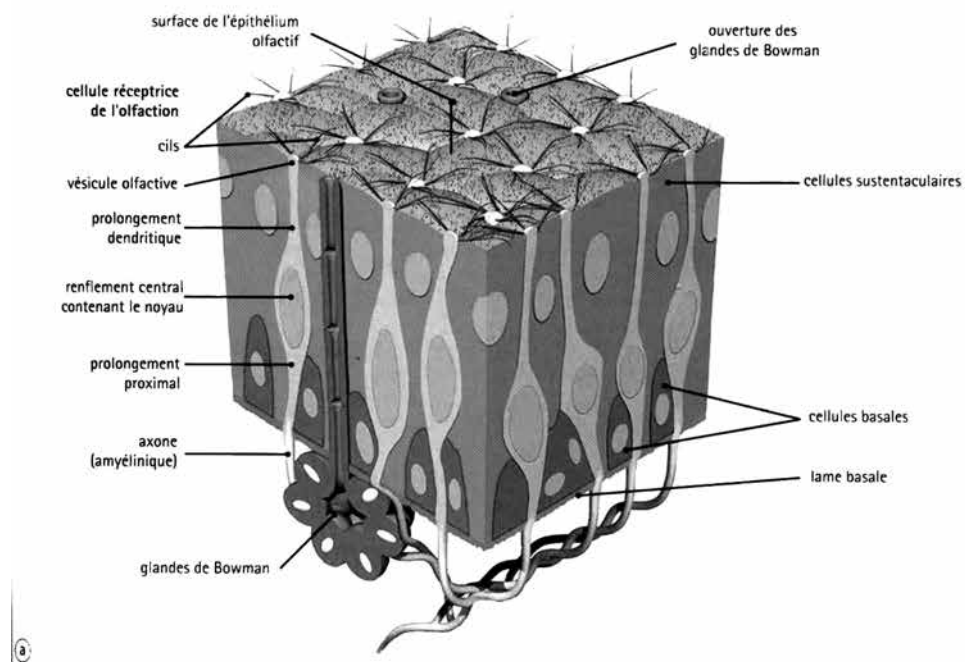






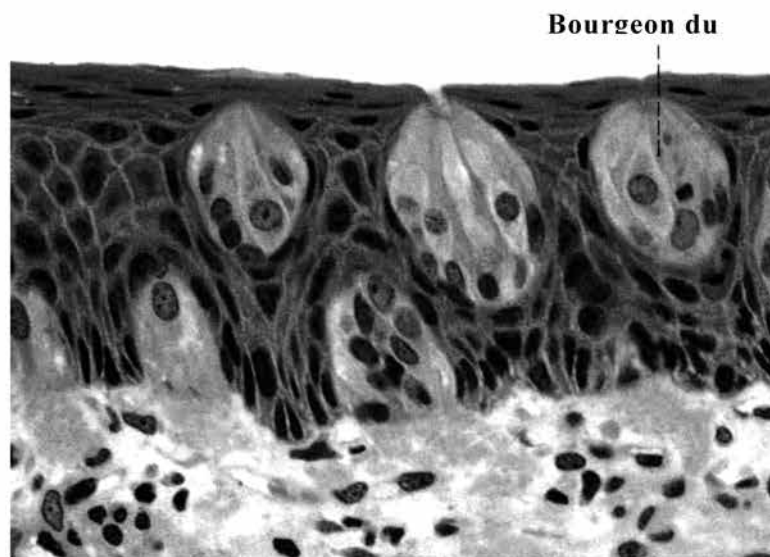
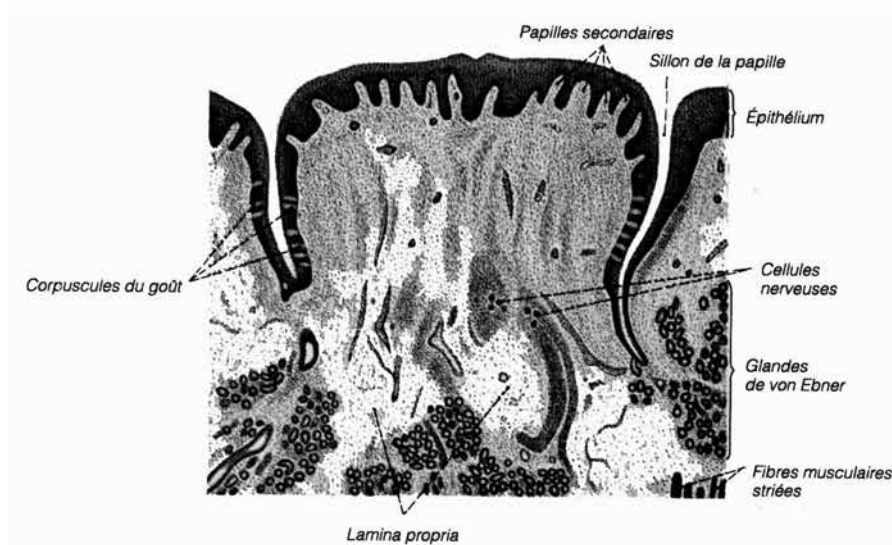
Formation de la vésicule otique. A La placode otique apparaît dans l'ectoderme superficiel adjacent au rhombocéphale vers la fin de la troisième semaine. B, C. Au jour 25, la placode s'invagine pour former la dépression otique. D-F. A la fin de la quatrième semaine, la poursuite de l'invagination fournit la vésicule otique qui se détache rapidement de l'ectoderme superficiel (ED = conduit endolymphatique). (A, F. de Kikuchi T, Tonosaki A, Takasaka T. 1988. Development of apical-surface structures of mouse otic placode. *Acta Otolaryngol* 106 : 200.).



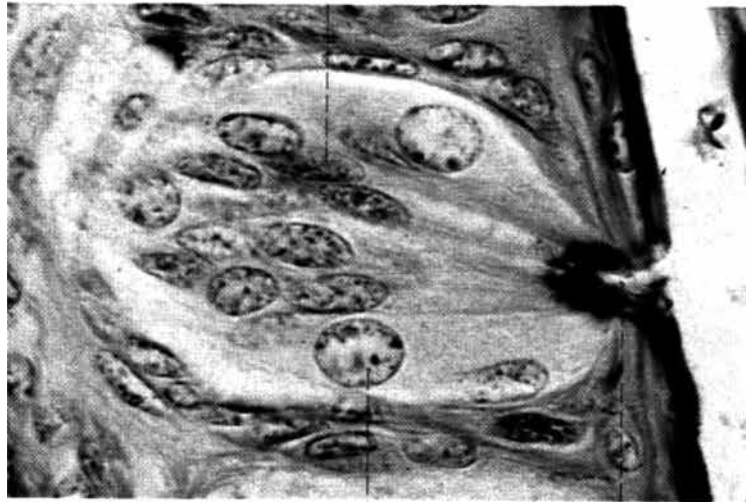


Veine avec érythrocytes

Glande olfactive

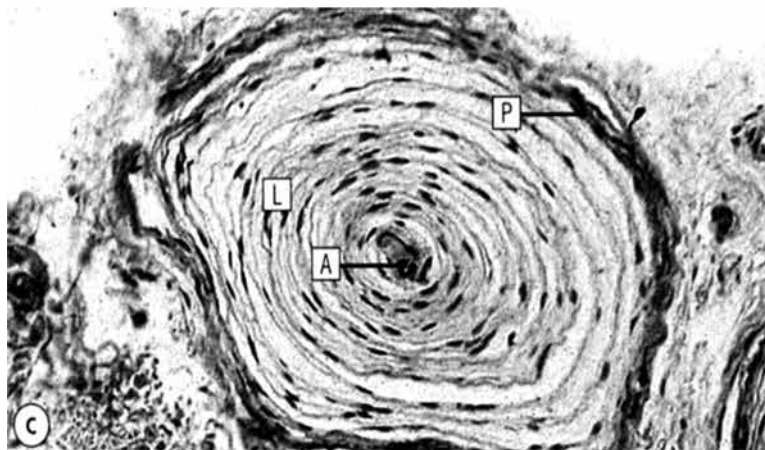


Noyau d'une cellule sensorielle

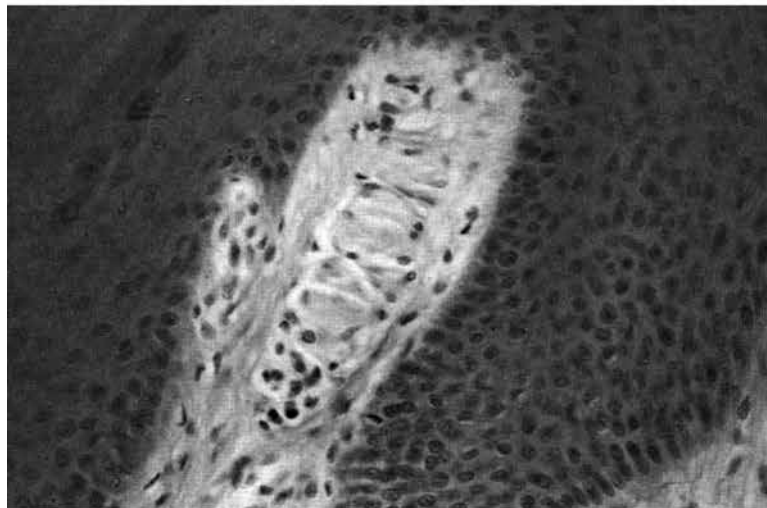


Noyau d'une cellule de soutien

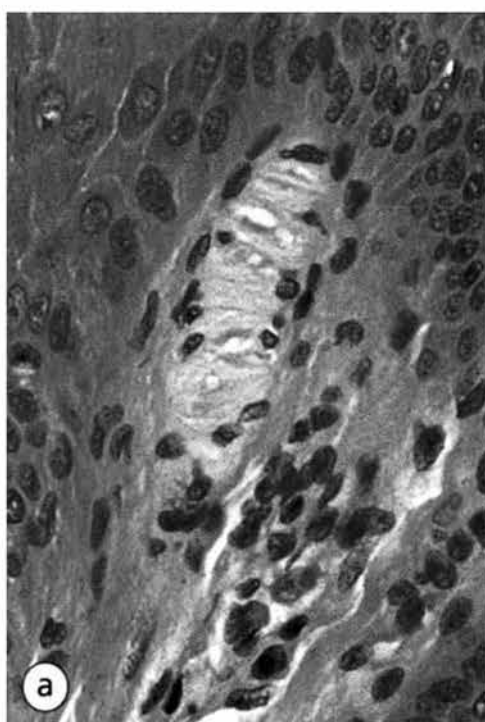
Pore gustatif garni de cils



Corpuscule de Pacini



Corpuscule de Meissner



PCEM2

THEME XI BIOPHYSIQUE

DIOPTRIQUE OCULAIRE

I-DESCRIPTION DIOPTRIQUE DE L'ŒIL.

I-1- GÉNÉRALITÉS.

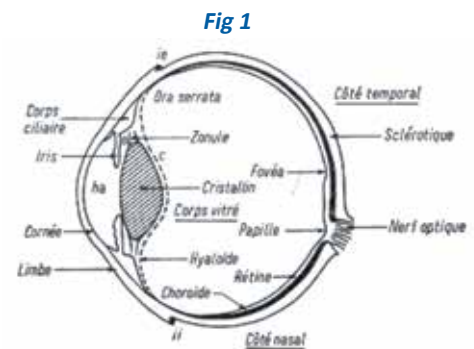
L'œil est l'organe de la vision, il a la forme approximative d'une sphère de 12 mm de rayon, il est logé dans la partie du crâne : le globe oculaire.

L'enveloppe de l'œil est une membrane : la sclérotique. la partie de cette membrane comprise entre la cavité oculaire et la partie osseuse est blanche et opaque. En avant, l'œil est bombé sous forme d'une calotte sphérique de 7 à 8 mm de rayon, à ce niveau, la sclérotique est transparente et prend le nom de cornée dont l'épaisseur est de 2 mm. La droite joignant les centres des deux sphères est l'axe géométrique.

I-2- PRINCIPAUX DIOPTRIS DE L'ŒIL.

La lumière pénétrant dans l'œil traverse une succession de milieux transparents avant d'atteindre la couche des récepteurs de la rétine. Ces milieux sont successivement (fig. 1) :

- * **la cornée** : partie antérieure transparente de la sclérotique ($n = 1,337$),
- * **l'humeur aqueuse** : dans la chambre antérieure de l'œil ($n = 1,337$),
- * **le cristallin** : lentille à structure feuilletée dont les faces antérieure et postérieure constituent les dioptries cristalliniennes antérieure et postérieure, dont les rayons respectifs sont 10 et 6 mm. Les feuillettes cristalliniennes n'ont pas le même indice de réfraction, de telle sorte qu'on obtient autant de dioptries internes que d'interfaces entre les feuillettes, ce qui entraîne que le trajet des rayons lumineux n'est pas rectiligne à l'intérieur de la lentille cristallinienne ($n_{\text{moyen}} = 1,42$). La puissance optique du cristallin est variable. En effet, il est maintenu en place par des fibres musculaires lisses issues du muscle ciliaire. Selon l'état de tension de ce muscle, les faces antérieures et postérieures du cristallin sont plus ou moins bombées et la convergence du cristallin se trouve modulée : c'est le phénomène d'accommodation.
- * **l'humeur vitrée** : dans la chambre postérieure ($n = 1,337$)
- * enfin, **les couches successives de la rétine**, les récepteurs sont placés dans la couche la plus profonde, là où prend véritablement naissance l'information visuelle.



I-3- L'ŒIL EST UN SYSTÈME CENTRÉ.

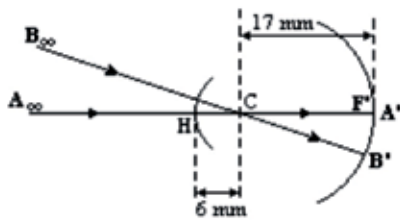
L'œil est formé, du point de vue optique, d'une succession de dioptries dont les centres sont approximativement alignés. L'axe optique qui joint les centres est confondu avec l'axe géométrique. Dans l'ordre, on trouve successivement :

- * le dioptre cornéen antérieur, de rayon $R = 7,8$ mm
- * la cornée d'indice $n = 1,337$
- * le dioptre cornéen postérieur, de rayon $R = 6,5$ mm
- * la chambre antérieure, remplie d'humeur aqueuse d'indice $n = 1,337$
- * le cristallin assimilable à une lentille biconvexe dont les rayons des faces d'entrée et de sortie sont respectivement de 10 et 6 mm. Son indice croît de l'extérieur vers le centre et a une valeur moyenne $n = 1,42$
- * la chambre postérieure de l'œil, remplie d'humeur vitrée, d'indice $n = 1,337$.

I-4- L'ŒIL RÉDUIT.

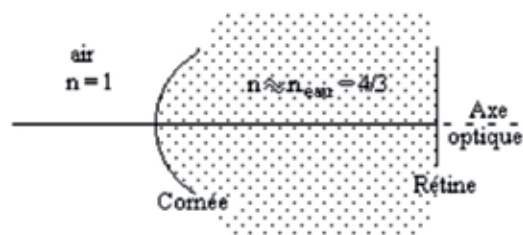
On peut montrer que l'ensemble est optiquement équivalent à un dioptre sphérique unique appelé œil réduit (dit de Listing) séparant deux milieux d'indices $n_1 = 1$ et $n_2 = 1,336$. Le sommet H est situé à 2 mm en arrière de la face antérieure de la cornée, le centre optique C est situé à 17 mm de la rétine. Le point C est tel qu'un rayon incident passant par C ne subit aucune déviation.

**Fig 2 : Oeil réduit de Listing
(Schéma d'après Didier)**



H = sommet ; C = Centre optique ;
 F' = Foyer image.

**fig. 3 : Dioptré sphérique équivalent à l'œil :
plan de coupe contenant l'axe optique.**



Ainsi, la face antérieure de la cornée sépare le milieu intérieur de l'œil, équivalent à l'eau, du milieu extérieur qui est, en général, l'air. Du point de vue optique géométrique, on assimile l'œil à un dioptré sphérique convergent de puissance :

$$D = \frac{1}{p} - \frac{n}{p'} = \frac{1-n}{R} = \frac{1}{f} = \frac{-n}{f} > 0$$

La puissance moyenne de l'œil est de 60 dioptries pour la lumière jaune. Le calcul du rayon de courbure donne une valeur de 5,6 mm pour le dioptré sphérique de l'œil réduit, on prend souvent un rayon de 6 mm.

L'expression de la puissance du dioptré sphérique montre que, pour une puissance D donnée, à une valeur de p , il correspond une seule valeur de p' . Inversement, à une valeur de p' , il correspond une seule valeur de p .

I-5- L'AXE VISUEL.

Il existe dans la rétine une petite fossette, la fovéa, de 0,3 mm de diamètre qui est la région la plus sensible de la rétine ; c'est là que se forment les images des objets que l'on regarde.

Du centre optique, la fovéa est vue sous un angle de 0,3/17 radian, ce qui correspond à peu près à 1 degré.

La droite qui joint le centre optique C à la fovéa est l'**axe visuel**. L'axe visuel n'est pas confondu avec l'axe optique du système centré, il fait avec lui un angle de 5 ° environ. La fovéa n'est donc pas confondue avec le foyer image F' ; cependant elle se trouve dans le plan focal image, à une distance de 1,5 mm du foyer F' du côté temporal.

I-6- LE DIAPHRAGME PUPILLAIRE.

L'iris se trouve entre la chambre antérieure et le cristallin. L'orifice central ou **pupille** a un diamètre variable qui peut aller de 2 à 8 mm de diamètre. Ce diamètre est modifié par voie réflexe lors de l'accommodation et lors d'une variation d'éclairement.

II- CLASSIFICATION DIOPTRIQUE DES YEUX.

II-1- CONDITION DE VISION NETTE.

En supposant que la rétine et les voies nerveuses optiques soient en état physiologique normal, la condition nécessaire, mais non suffisante, doit être respectée : **La vision est nette si l'image se forme sur la rétine**. Cette condition entraîne deux autres :

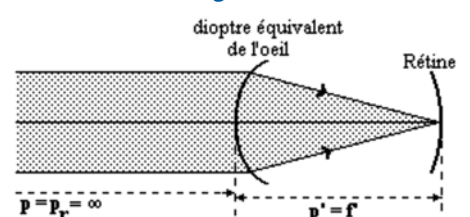
- * L'image d'un point est un point : c'est la condition de stigmatisme.
- * L'image peut être déplacée sur la rétine ; ceci suppose que la puissance de l'œil peut varier.

II-2- CLASSIFICATION.

II-2-1- Si, dans les conditions de **Gauss**, l'image d'un point est un point : l'œil est capable de réaliser le **stigmatisme**. C'est ce qui se produit lorsque l'œil a une symétrie de révolution, c'est-à-dire que tous ses dioptrés sont assimilés à des calottes sphériques dont les centres sont situés sur l'axe optique.

Si l'œil possède la propriété de stigmatisme, on est en droit de parler des plans conjugués. Une définition fondamentale doit être donnée : celle du **remotum**.

Fig. 4



Pour l'œil emmétrope, le conjugué de la rétine est à l'infini

Par définition : **Le remotum est le plan conjugué de la rétine dans l'œil non corrigé, au repos**, c'est-à-dire en l'absence d'accommodation, lorsque la puissance de l'œil est minimale.

Pour les yeux à symétrie sphérique, lorsque cette image se forme sur la rétine :

* si le plan objet est à l'infini, l'œil est dit **emmétrope**.

* si le plan n'est pas à l'infini, l'œil est **amétrope**. On parle, dans ce cas d'une amétropie sphérique.

A- LES AMETROPIES SPHÉRIQUES.

I- les deux types d'amétropies sphériques

On distingue deux types d'amétropies sphériques : la myopie et l'hyperopie.

I-1- La myopie.

Sans accommodation, la rétine de l'œil myope est en arrière du plan focal image. Le système optique de l'œil est trop convergent (fig.) et le punctum remotum est réel et positif ; la proximité du remotum R est positive (Fig).

Fig 5

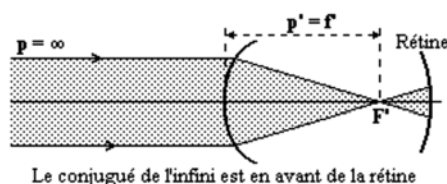
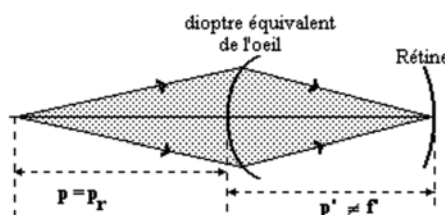


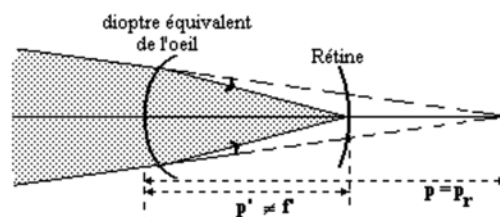
Fig 6



I-2-L'hyperopie.

Sans accommodation, la rétine de l'œil hyperope est en avant du plan focal image. Le système optique de l'œil n'est pas assez convergent (fig.) et le punctum remotum est virtuel et négatif ; la proximité du remotum R est négative (Fig).

Fig 7



II- Correction des amétropies sphériques.

On corrige la vision d'un œil amétrope, en lui associant une lentille sphérique de telle sorte que, le système optique qu'il forme avec elle, donne de l'infini une image sur la rétine. Autrement dit, le foyer image de la lentille correctrice doit être au remotum de l'œil. Cette lentille sera placée :

* contre la cornée et en contact avec elle ; ce sera une lentille de contact.

* devant l'œil, à une distance **d** : valeur qui sera négligée devant la distance focale de la lentille correctrice.

Remarque :

Pour l'œil, une distance est considérée infinie, si elle est très grande par rapport aux dimensions du globe oculaire. Généralement, les distances > 5mètres sont considérées comme infinies.

Fig 8

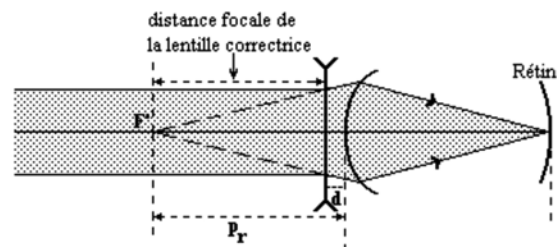
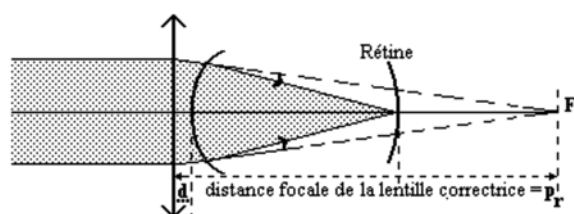


Fig 9



II-1- Correction d'un œil myope.

On corrige un œil myope avec une lentille sphérique divergente (dont la puissance est la plus faible pour supprimer tout effort supplémentaire d'accommodation), qui permet de voir net à l'infini.

II-2- Correction d'un œil hyperope.

On corrige un œil hyperope avec une lentille sphérique convergente (dont la puissance est la plus grande pour supprimer tout effort d'accommodation supplémentaire), qui permet de voir net à l'infini.

II-3- Puissance de la lentille correctrice :

Que ce soit dans le cas de l'œil myope ou celui de l'hyperope, la distance focale de la lentille correctrice dépend de la distance **d** qui la sépare de l'œil tel que : **f' = p_r - d**.

Généralement, la distance **d** est négligeable devant **p_r** d'où, on peut considérer que **f' = p_r**; ou **1 / f' = 1 / p_r**; ce qui veut dire que la puissance de la lentille **D** correctrice est égale à la proximité du remotum **R**

$$\text{ou : } D = \frac{1}{f} = \frac{-1}{f} = -R$$

On remarque que lorsqu'on ajoute la puissance **D** de la lentille correctrice à la valeur algébrique de **R**, on trouve **0**; ce qui veut dire que la valeur corrigée de **R** est **R_{corr} = 0**. **L'œil corrigé devient emmétrope.**

II-4- Origine des amétropies sphériques.

L'emmétropie stricte, lorsque la rétine est au plan focal image lorsque l'œil n'accommode pas, est un heureux hasard. Au cours du développement embryonnaire de l'œil et au cours de sa croissance, il existe une concordance parfaite entre la puissance de l'œil et sa longueur. Actuellement on classe les amétropies sphériques en :

II-4-1- Amétropies de conformation.

Ce sont des amétropies peu importantes, non pathologiques et non évolutives pour lesquelles :

- * il n'y a aucun trouble dans le développement de l'œil.
- * il y a concordance non parfaite entre la puissance de l'œil et sa longueur due aux fluctuations statistiques autour de la normale avec un écart type de 0,7 dioptrie.
- * il y a autant de myopies que d'hyperopies.

II-4-2- Amétropies axiales.

Ce sont des amétropies pathologiques et évolutives pour lesquelles :

- * il n'y a un trouble vrai dans le développement de l'œil.
- * il n'y a pas de concordance entre la puissance de l'œil et sa longueur; l'œil est raccourci dans le cas de l'hyperopie, l'œil est allongé dans le cas de la myopie.

Ce sont des amétropies importantes

Pour un dioptré sphérique, $D = \frac{-n}{f} > 0$

En dérivant **D** par rapport à **f'**, on obtient :

$$\frac{\Delta D}{\Delta f} = \frac{-n}{f^2} ; \text{ avec } D = \frac{-n}{f} ; \text{ on a } \frac{\Delta D}{\Delta f} = \frac{D^2}{n}$$

Exemple :

Pour $n = 4/3$, $D = 60$ dioptries et $Df' = 1$ mm; on a $R = 2,7$ dioptries et $p_r = 0,37 = 37$ cm.

II-4-3- L'œil aphaque.

L'ablation chirurgicale du cristallin (dans le cas d'une cataracte par exemple) d'un œil le rend **aphaque**, il perd la puissance due au cristallin et devient hyperope de 12 à 14 dioptries.

III- L'accommodation de l'œil emmétrope ou amétrope.

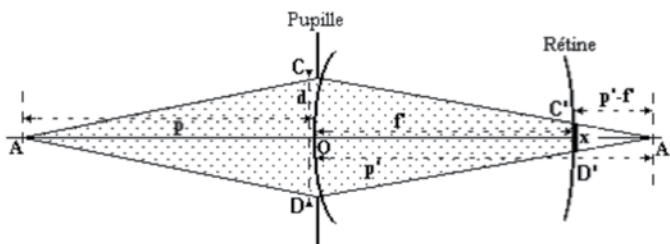
III-1- Nécessité de l'accommodation.

Considérons, par exemple, le cas de l'œil **emmétrope** au repos, sa vision de l'infini est nette.

La rétine se trouve approximativement dans le plan focal image; son plan conjugué est donc le plan à l'infini de l'espace objet, et seuls les objets éloignés seraient vus nets. Si l'œil gardait la même puissance, un objet qui se rapproche serait de plus en plus flou.

D'une façon plus précise, si aucun mécanisme n'intervenait, l'œil verrait tout point rapproché sous forme d'une tache de diffusion (fig. 3).

Fig 10 : Œil réduit emmétrope n'accommodant pas



Considérons un objet **A** placé à une distance **OA = p** d'un dioptré sphérique, émettant un faisceau divergent. À cause de l'existence d'un diaphragme pupillaire de diamètre **d**,

* la partie qui arrive au dioptré est limitée par les rayons extrêmes **AC** et **AD**. La distance focale image de ce dioptré est **f'**, donc

* le foyer image **F'** est le centre de la tache de diamètre **x** qui se forme sur la rétine, étant donné que la convergence du faisceau par le dioptré se fait en un point **A'** distant de **O** de **OA' = p'** tel que **p' > f'**.

Les triangles **A'CD** et **A'C'D'** sont semblables ; on peut écrire :

$$\frac{d}{p'} = \frac{x}{p' - f'} \quad (1)$$

$$\text{soit : } x = d \cdot \frac{(p' - f')}{p'} = d \left(1 - \frac{f'}{p'} \right) \quad (2)$$

$$\text{or : } \frac{f}{p} + \frac{f}{p'} = 1 \quad \text{donc : } 1 - \frac{f'}{p'} = \frac{f}{p} \quad (3)$$

en remplaçant $1 - \frac{f'}{p'}$ par $\frac{f}{p}$ dans la relation (2), on obtient :

$$x = \frac{d \cdot f}{p}$$

Pour l'œil réduit, en supposant la pupille placée au sommet du dioptré, on voit que le diamètre **x** de la tache de diffusion est proportionnel :

- * au diamètre d'ouverture **d** de la pupille,
- * à la distance focale objet **f**
- * à l'inverse de la distance **p** de l'objet à l'œil.

Sachant que **D = 1/f**, en appelant **par définition** le rapport $\frac{1}{p} = P$; on obtient : $x = \frac{d \cdot P}{D}$

Application :

Dans le cas où : **d** = 4 mm ; **D** = 60 dioptries ; on obtient : $x(\text{mm}) = \frac{P}{15}$

donc un point situé à 1 m donne une tache de diffusion de $\frac{1}{15}$ mm. Cette valeur est extrêmement grande et les objets rapprochés seraient vus extrêmement flous.

Si la pupille avait un diamètre plus petit, de $\frac{4}{15}$ mm de diamètre, par exemple, le diamètre de la tache de diffusion serait aussi divisé par 10 ; d'où on obtient une amélioration de la netteté, mais au dépens de la luminosité.

C'est ainsi que le **réflexe pupillaire à la lumière** améliore la vision en diminuant l'orifice pupillaire.

III-2- Rôle de la pupille.

Le réflexe de contraction pupillaire à l'accommodation donne un effet de trou sténopéique, qui entraîne une réduction de la tache de diffusion, masquant de plus les inégalités de courbure du cristallin.

III-3- Mesure de l'accommodation.

On mesure le degré d'accommodation de l'œil par **son augmentation de puissance à partir du repos**.

Pour un œil **emmétrope** au **repos**, la puissance est minimale, le conjugué de la rétine est à l'infini.

les formules du dioptre équivalent donnent :

$$\frac{1}{p} - \frac{n}{p'} = D$$

Si $p = \text{l'infini}$ et $p' = f'$; on obtient : $-\frac{n}{f} = D_{\min}$

Lorsque l'œil accommode, p est fini et $1/p = P$ différent de 0 d'où :

$$\frac{1}{p} + D_{\min} = D \quad \text{ou} \quad P + D_{\min} = D$$

ou encore : $P = D - D_{\min} = A$ (en dioptries)

Ainsi, **l'augmentation de la puissance A de l'œil emmétrope est égale à la proximité P du point à voir net.**

On peut la réaliser artificiellement, en plaçant contre l'œil qui n'accommode pas, une lentille convergente convenablement choisie. La puissance de cette lentille n'est autre que la proximité du point vu net.

III-4- Amplitude d'accommodation (Am).

Définition du punctum proximum :

C'est le point pour lequel l'accommodation est maximale (**Am**).

Amplitude maximale d'accommodation (Am) est la différence des proximités du punctum proximum et du punctum remotum ; elle mesure l'augmentation maximale de la puissance de l'œil. Pour l'œil emmétrope, elle est égale à la proximité du **punctum proximum**.

On détermine l'amplitude maximale d'accommodation d'un œil emmétrope :

- * soit en cherchant la **valeur la plus grande (en valeur absolue) de la puissance de la lentille divergente** qui permet de voir distinctement un objet à l'infini sans accommodation.
- * soit en rapprochant de l'œil progressivement un objet jusqu'à ce qu'il ne puisse plus être vu nettement. L'objet se trouve alors au **punctum proximum**.

III-5- Variation de l'accommodation avec l'âge. La presbytie.

L'amplitude d'accommodation diminue avec l'âge par défaut de plasticité du cristallin. Cette sclérose cristallinienne ne modifie pas les indices de réfraction.

Voici, d'après Waller, les courbes (fig. 11) (ce sont des moyennes statistiques) représentant la variation des proximités du remotum et du proximum en fonction de l'âge. Retenons, d'après cette courbe, que l'amplitude d'accommodation est :

- * de 14 dioptries dans l'enfance
- * de 10 dioptries à 25 ans
- * de 4 dioptries à 40 ans
- * voisine de 0 à partir de 60 ans.

Si l'amplitude d'accommodation est supérieure à **4 dioptries**, le pr corrigé du sujet = infini ;

$$A = P - R ; \text{ d'où } P = A + R = A ;$$

$$\text{d'où pp corrigé} = 1 / A < 0,25 \text{ m}$$

Le champ de vision nette s'étend donc de l'infini (sans accommodation) jusqu'à une distance inférieure à 25 cm. Le sujet voit tous les plans entre 25 cm et l'infini.

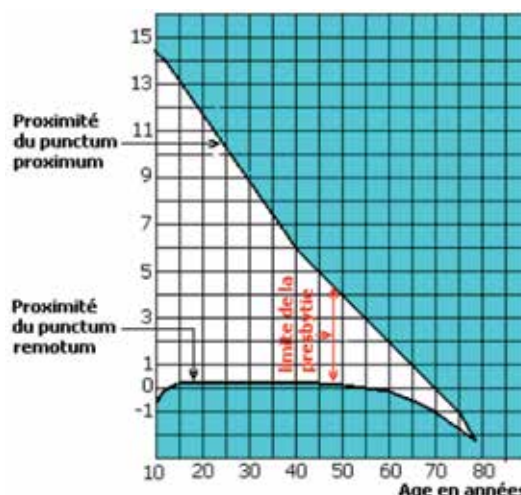
On dit qu'il y a **presbytie** lorsque l'amplitude d'accommodation devient inférieure à 4 dioptries.

III-6- correction de l'œil presbyte.

Si l'amplitude d'accommodation est inférieure à **4 dioptries**, c'est le cas du sujet presbyte, le p_p corrigé du sujet est plus éloigné que 25 cm. Le sujet emmétrope (ou amétrope corrigé) ne verra donc pas net à 25 cm.

Pour pouvoir voir net à 25 cm, il faut associer à l'œil presbyte une lentille sphérique de telle sorte que, le système optique qu'il forme avec elle, donne d'un objet à 25 cm une image sur la rétine. Donc réaliser un ppcorrigé de 0,25 m soit une proximité du proximum égale à 4 dioptries.

Fig 11 : Variation avec l'âge de la Proximité du remotum et de celle du proximum (cas d'un œil emmétrope)



Sachant que $R = P - A$; ce sujet aura un R corrigé positif, ce qui veut dire que, avec la lentille qui corrige la proximité de son proximum, le sujet emmétrope ne verra pas net à l'infini. Au total le sujet presbyte doit avoir une double correction :

- * une correction pour voir net à l'infini ; dans ce cas, il ne verra pas net les objets rapprochés.
- * une correction pour voir nets les objets rapprochés, il ne verra pas nets, dans ce cas, l'infini.

On conseillera au sujet presbyte des verres bifocaux, composés de deux parties : une partie supérieure destinée à la vision de loin et corrigeant l'amétropie éventuelle ; et une partie inférieure destinée à la vision de près de puissance supérieure à celle de la première partie.

Il existe actuellement des verres à focales multiples qui permettent de voir nets plusieurs plans.

On corrige la presbytie en donnant artificiellement à l'œil le complément de puissance utile au moyen d'une lentille convergente. La puissance de cette lentille doit être calculée de telle sorte que, sa puissance ajoutée à l'amplitude d'accommodation, fasse au total 3 à 3,5 dioptries ; d'où la règle empirique suivante :

- * à 50 ans, le verre correcteur est de 1 dioptrie,
- * on ajoutera, par la suite, 1 / 2 dioptrie tous les 5 ans.

Effets de la presbytie.

1- Œil emmétrope.

La proximité du proximum est égale à **A**, donc $A \leq 4$ entraîne $P \leq 4$; l'effet de la presbytie apparaît vers 50 ans. Le punctum proximum recule à partir de 25 cm, le sujet ne peut plus voir net les objets rapprochés. Il éloigne, par exemple un journal, pour pouvoir le lire.

2- Œil myope.

$A = P - R$ entraîne $P = A + R$. R étant positif pour le myope, donc P est nécessairement supérieur à A (**P peut être > 4** dioptries même si **A < 4** dioptries) d'où les objets rapprochés peuvent être vus nets et l'effet de la presbytie ne se manifeste pas à 50 ans ; et si R est supérieur à 4 dioptries, l'effet de la presbytie ne se manifeste jamais ; c'est-à-dire que le myope voit toujours nets les objets rapprochés.

3- Œil hyperope.

$A = P - R$ entraîne $P = A + R$. R étant négatif pour l'hyperope, donc P est nécessairement inférieur à A ; d'où, si **A < 4** dioptries, cela entraîne que **P < 4** dioptries apparaît plus tôt que 50 ans ; D'où, l'effet de la presbytie se manifeste avant 50 ans ; et si **IRI > 4** dioptries, à partir de 50 ans, le sujet hyperope ne voit plus aucun plan net de l'espace réel.

III-7- Micro fluctuations de l'accommodation.

Les aberrations de l'optique géométrique.

Ce sont les écarts aux approximations précédentes qui supposaient :

- * L'existence pour chacun des milieux réfringents de l'œil d'un indice de réfraction indépendant de la longueur d'onde ; en réalité, ces indices varient avec la longueur d'onde et il en résulte ce qu'on appelle une **aberration chromatique**.
- * l'approximation de Gauss (les rayons sont peu inclinés sur l'axe optique) et la sphéricité des dioptries ; les écarts à ces approximations représentent les **aberrations géométriques**.
- * L'approximation de l'optique géométrique elle-même, qui ne tient pas compte de la nature ondulatoire de la lumière ; celle-ci entraîne l'existence des phénomènes de **diffraction**.
- * Les milieux de l'œil **parfaitement transparents** ; en réalité, leurs défauts d'homogénéité entraînent l'existence de **lumière diffusée**.

B- LES AMETROPIES NON SPHÉRIQUES. L'ASTIGMATISME.

Un œil est astigmat, lorsque dans l'approximation de Gauss, l'image d'un point n'est pas ponctuelle.

L'astigmatisme est dû au fait que les dioptries oculaires n'ont pas une symétrie de révolution. En réalité, il est dû essentiellement au dioptré cornéen.

I- Les différents types d'astigmatisme.

I-1- L'astigmatisme cornéen.

On distingue deux types d'astigmatismes cornéens :

- * **l'astigmatisme cornéen régulier**, auquel on va s'intéresser, qui peut être corrigé par une association de lentilles.
- * **l'astigmatisme irrégulier** pour lequel, la cornée a une structure irrégulière (kératocône, cornée brûlée ou blessée...). La réfraction de la lumière se fait de façon très anarchique, selon l'endroit où les rayons frappent la cornée. Cet astigmatisme ne peut pas être corrigé par des lentilles. L'astigmatisme irrégulier sera corrigé par une lentille de contact.

I-2- L'astigmatisme cristallinien.

Quand on corrige l'astigmatisme cornéen, il persiste parfois un astigmatisme résiduel qu'on attribue au cristallin et qui varie avec l'accommodation. **Young** plonge la tête dans l'eau, les yeux ouverts, pour neutraliser l'astigmatisme cornéen.

II- L'astigmatisme régulier

II-1- Les méridiens principaux.

Dans le cas de l'astigmatisme régulier, la courbure de la cornée passe progressivement par un maximum et par un minimum pour deux méridiens perpendiculaires appelés méridiens principaux. On peut comparer la cornée à un dos de cuillère, le rayon de courbure est maximal dans un plan contenant le manche (on parle de courbure minimale) et il est minimal dans un plan perpendiculaire (courbure maximale). Comme la puissance est donnée par la relation :

$$D = \frac{n-1}{R}$$

d'où :
 * Au rayon de courbure minimal correspond une puissance maximale.
 * Au rayon de courbure maximal correspond une puissance minimale.

La différence entre ces deux puissances est le degré d'astigmatisme : **DD**

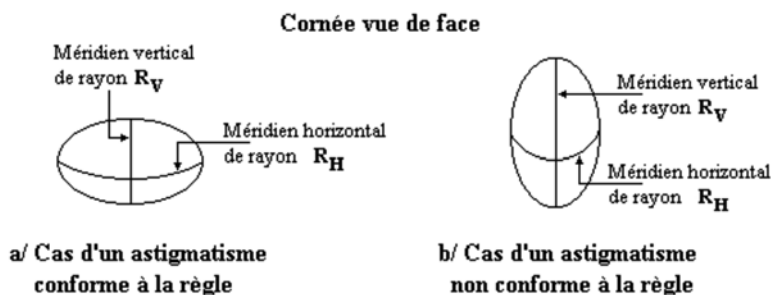
Les directions des méridiens principaux sont, en général, voisines de l'horizontale et de la verticale. Les directions obliques sont rares. Selon la forme de la cornée, vue de face, on définit :

II-2- L'astigmatisme conforme à la règle ou direct :

C'est le plus fréquent, dans ce cas :

$$R_H > R_V, DD = D_V - D_H > 0$$

Fig 12



II-3- L'astigmatisme non conforme à la règle ou inverse :

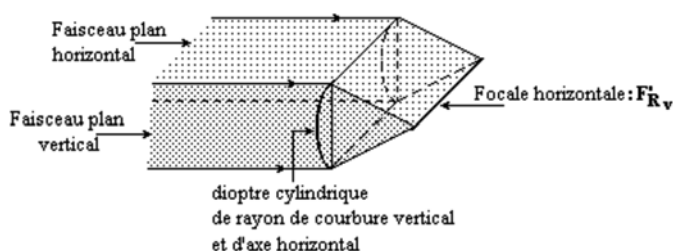
Cet astigmatisme est plus rare et mal supporté, dans ce cas :

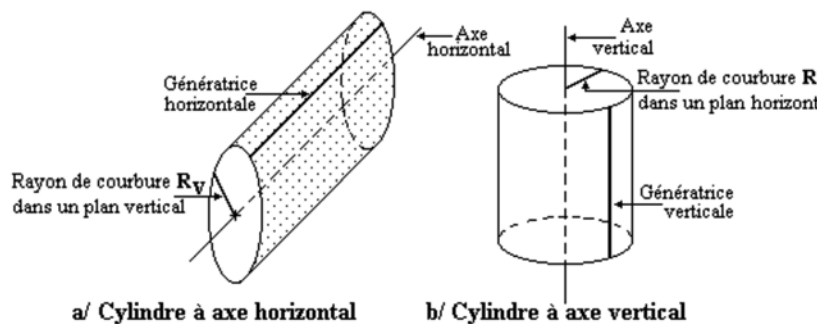
$$R_H < R_V, DD = D_V - D_H < 0$$

III- Les focales :

III-1- Pour comprendre les focales, prenons le cas par exemple de la cornée astigmatique conforme à la règle et assimilons la une portion de cylindre de **courbure verticale** donc **d'axe horizontal (Fig.)** et traçons le cheminement d'un faisceau cylindrique qui traverse le dioptré cylindrique : la convergence se fait selon un segment de droite horizontale appelé **focale horizontale**.

Fig 13 : Convergence d'un faisceau cylindrique par un dioptré cylindrique à axe horizontal





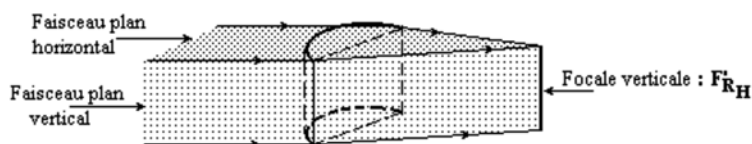
Si on assimile la cornée à une portion de cylindre à axe vertical, la convergence se fait selon un segment de droite vertical appelé : **focale verticale**.

La puissance de la cornée dans un plan horizontal est D_H :

$$D_H = \frac{n-1}{R_H}$$

Donc à la courbure horizontale (au méridien horizontal) correspond la focale verticale.

Fig 14 : Convergence d'un faisceau cylindrique par un dioptrique cylindrique à axe vertical



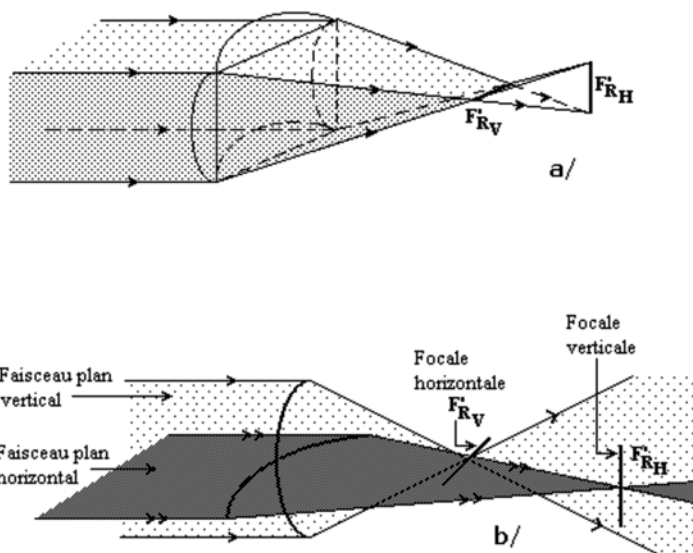
Une cornée astigmatique a une courbure dans un plan vertical qui lui correspond une focale horizontale et, une courbure dans un plan horizontal qui lui correspond une focale verticale. Les focales horizontale et verticale sont distinctes.

La puissance de la cornée dans un plan vertical est : $D_V = \frac{n-1}{R_V}$

Donc à la courbure verticale (au méridien vertical) correspond la focale horizontale.

Dans le cas de l'astigmatisme conforme à la règle où le rayon horizontal est plus grand que le rayon vertical, la focale horizontale sera en avant de la focale verticale, étant donné que le méridien vertical est plus puissant.

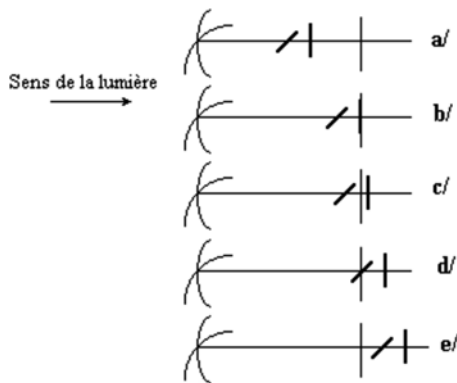
Fig 15 : Focales horizontale et verticale d'un œil astigmatique conforme à la règle



III-2- Place des focales par rapport à la rétine.

Selon la position des focales d'un œil astigmatique par rapport à la rétine, on distingue 5 cas d'astigmatisme.

Fig 16



a/ astigmatisme myopique composé : les deux focales sont en avant de la rétine.

b/ astigmatisme myopique simple : une focale est en avant de la rétine, la deuxième est sur la rétine.

c/ astigmatisme composé : une focale est en avant de la rétine, la deuxième est en arrière de la rétine.

d/ astigmatisme hyperopique simple : une focale est en arrière de la rétine, la deuxième est sur la rétine.

e/ astigmatisme hyperopique composé : les deux focales sont en arrière de la rétine.

Comment voit un œil astigmatique ?

L'œil accommode de façon amener une de ses focales sur la rétine :

Exemples :

* Si la focale verticale est sur la rétine, il verra un objet ponctuel situé à l'infini sous forme d'un petit segment de droite verticale net.

S'il regarde un objet rectiligne linéaire vertical, il le verra sous forme d'un segment de droite verticale net. En effet, chaque point de l'objet donne une image sous forme d'un petit segment vertical net ; l'ensemble des segments correspond à un autre segment de droite de dimension plus grande.

S'il regarde un objet rectiligne horizontal, il le verra sous forme d'une bande horizontale. En effet, chaque point de l'objet donne une image sous forme d'un petit segment vertical net ; l'ensemble des segments juxtaposés les uns à côté des autres forment la bande horizontale.

Si la focale horizontale est sur la rétine :

Il verra un objet ponctuel situé à l'infini sous forme d'un petit segment de droite horizontale net.

S'il regarde un objet rectiligne linéaire vertical, il le verra sous forme d'une bande verticale. En effet, chaque point de l'objet donne une image sous forme d'un petit segment horizontal net ; l'ensemble des segments juxtaposés les uns sur les autres correspond à la bande verticale.

IV- Correction de l'astigmatisme cornéen régulier.

On corrige l'astigmatisme en ramenant la convergence pour les deux méridiens principaux au même point ; c'est-à-dire déplacer une des deux focales et l'amener sur la deuxième. Si l'astigmatisme est conforme à la règle,

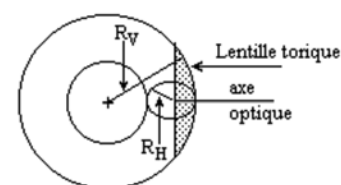
* il faudra, par exemple, reculer la focale horizontale. Pour cela, il faut agir sur la courbure verticale de la cornée en plaçant devant celle-ci une lentille cylindrique à courbure verticale donc à axe horizontal. Cette lentille sera divergente, sa puissance sera égale au degré d'astigmatisme.

* On pourra aussi, au lieu de reculer la focale horizontale, avancer la focale verticale et l'amener sur la focale horizontale. On utilisera pour cela, une lentille cylindrique convergente de puissance égale au degré d'astigmatisme.

Lorsque l'astigmatisme du sujet est corrigé, l'œil peut garder une amétropie sphérique qui sera corrigée par une lentille sphérique.

En conclusion, la vision d'un œil astigmatique sera corrigée par une association d'une lentille cylindrique dont on définira l'orientation de l'axe et la puissance qui corrigera l'astigmatisme ; et d'une lentille sphérique dont on précisera la puissance qui corrigera l'amétropie sphérique résiduelle. En pratique, cette association de lentilles est remplacée par une lentille torique (Un tore est un solide de révolution engendré par un cercle tournant autour d'une droite située dans son plan, mais ne passant pas par son centre).

Fig 17



fgrjdnvzbzurjvbx<lapnnfrwe

EVALUATION FORMATIVE

Test 1

On assimile l'œil d'un sujet **normal** à un dioptre sphérique convergent de rayon de courbure **5 mm** et d'indice de réfraction **4/3**.

1- Calculer la puissance de ce dioptre.

2- Tracer le cheminement d'un faisceau de lumière provenant de l'infini parallèlement à l'axe optique.

Test 2

1- Calculer la puissance du dioptre sphérique cornéen antérieur de l'œil d'un sujet supposé normal de rayon : 8,33 mm et d'indice de réfraction : $n = 1,33$.

2- Que devient la puissance de ce dioptre quand le sujet plonge la tête dans l'eau, les yeux ouverts (l'indice de réfraction de l'eau = 1,33) ?

Test3

Soit un objet en forme de disque placé à l'infini dont le plan est perpendiculaire à l'axe optique d'un œil.

1- Construire l'image du disque pour un œil, dont l'accommodation a été paralysée, dans le cas d'un :

* emmétrope. * myope. * hyperope.

2- Si l'accommodation est rétablie, existe-t-il une différence dans la formation de l'image rétinienne avec le (1-) ? Commenter chacun des 3 cas.

Test 4

Le pr est le conjugué de la rétine lorsque l'œil est au repos. Représenter le cheminement d'un faisceau lumineux incident, passant par le pr, dans le cas d'un :

* emmétrope.

* myope.

* hyperope.

Test 5

À partir de la relation de conjugaison du dioptre sphérique :

$$\frac{n}{p} - \frac{n'}{p'} = \frac{n - n'}{R} = D$$

retrouver la relation $A = P - R$. Définir A, P et R.

Test 6

Montrer que, si on considère que la position du punctum remotum ne varie pas, on a un éloignement du punctum proximum lorsqu'on avance dans l'âge.

Test 7

Un emmétrope âgé de 25 ans a son punctum proximum à 33,3 cm. Vrai ou faux, expliquer pourquoi ?

Test 8

1- Un myope de 4 dioptries, âgé de 25 ans, a une amplitude maximale d'accommodation de 10 dioptries. Vrai ou faux, expliquer pourquoi ?

2- Ce sujet corrigé aura une amplitude maximale d'accommodation de 14 dioptries. Vrai ou faux, expliquer pourquoi ?

Test 9

Comparer l'allure de la variation de l'amplitude maximale d'accommodation avec l'âge pour les sujets suivants :

* emmétrope.

* myope de 2 dioptries.

* hyperope de 3 dioptries.

Test 10

1- a- Montrer que, dans le cas d'un œil hyperope de R dioptries, le pp peut être positif, nul ou négatif.

b- Comparer les valeurs de A et R dans chaque cas ?

2- En est-il de même pour un œil myope ?

Test 11

Montrer que dans le cas de la figure suivante, on a : $x = \frac{d}{D_p}$

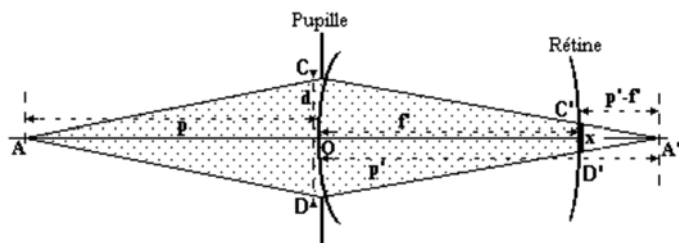
où : * x = diamètre de la tache de diffusion

* D = puissance du dioptre sphérique équivalent à un œil emmétrope dot l'accommodation a été paralysée.

* d = diamètre de la pupille.

On donne la formule du dioptre sphérique :

$$\frac{n}{p} - \frac{n'}{p'} = \frac{n - n'}{R} = D \quad \text{avec : } \frac{f}{p} - \frac{f'}{p'}$$



Test 12

1- Un sujet ne peut pas lire une affiche située à 5 m, par contre, il peut la lire en regardant à travers un trou de 1 mm de diamètre. Expliquer pourquoi?

2- Ce sujet peut-il être :

* emmétrope ?

* myope ?

* hyperope jeune ?

* hyperope presbyte ?

Test 13

Un sujet hyperope a sa vision améliorée en observant à travers un trou sténopéique de 1 mm de diamètre ; vrai ou faux ? Justifier.

Test 14

Un sujet myope n'a pas sa vision améliorée en observant à travers un trou sténopéique de 1 mm de diamètre ; vrai ou faux ? Justifier. On supposera que les voies nerveuses sont normales.

Test 15

1- Tracer le cheminement d'un rayon lumineux provenant de l'infini dans les deux cas suivants :

a- œil myope corrigé avec une lentille sphérique divergente placée à une distance d de l'œil.

b- œil hyperope corrigé avec une lentille sphérique convergente placée à une distance d de l'œil.

Test 16

Pour les sujets suivants, on demande :

- 1- La position du pp.
- 2- Y-a-t-il presbytie ?

3- Doit-on corriger et par que type de lentille pour la vision de loin ?

4- Doit-on corriger et par que type de lentille pour la vision de loin ?

- 1- Œil emmétrope dont l'amplitude maximale d'accommodation est de 3 dioptries.
- 2- Œil myope de 2 dioptries dont l'amplitude maximale d'accommodation est de 3 dioptries.
- 3- Œil hyperope de 2 dioptries dont l'amplitude maximale d'accommodation est de 3 dioptries.
- 4- Comparer l'âge des 3 sujets.

Test 17

1- Calculer les distances respectives du pr et du pp d'un œil hyperope de 4 dioptries dont l'amplitude d'accommodation est de 2 dioptries.

2- Ce sujet peut-il
a- voir l'infini ?

b- voir à 33 cm ?

3- En cas de réponses négatives pour la question précédente, quelles sont les caractéristiques des lentilles correctrices à utiliser pour corriger la vision de ce sujet pour :
a- voir l'infini.

b- voir à 33 cm.

Test 18

Soit un sujet âgé de 70 ans, myope de 4 dioptries.

1- Calculer la position de son punctum remotum.

2- Calculer la position de son punctum proximum.

3- Pour lire à 25 cm, lui conseillez-vous :
a- de porter des verres convergents ? Dans ce cas, préciser la puissance.

b- de porter des verres divergents de 4 dioptries ?

4- Quels verres correcteurs doit-il porter pour conduire sa voiture ?

Test 19

Soit un sujet jeune hyperope de 4 dioptries, dont l'amplitude maximale d'accommodation est de 8 dioptries.

1- Calculer la position de son punctum remotum.

2- Calculer la position de son punctum proximum.

3- Lorsque ce sujet aura 80 ans, quel type de verres correcteurs lui conseilleriez-vous pour lui permettre de lire à 33 cm. On suppose que son hyperopie reste constante ?

Test 20

I- Associer à chacun des sujets A, B, C, D, E une ou plusieurs proposition(s) parmi : 1, 2, 3, 4, 5.

Sujets :

A- Myope de 2 dioptries ayant une amplitude maximale d'accommodation de 4 dioptries.

B- Hyperope de 1 dioptrie ayant une amplitude maximale d'accommodation de 3 dioptries

C- Myope de 4 dioptries ayant une amplitude maximale d'accommodation de 11 dioptries

D- Hyperope de 2 dioptries ayant une amplitude maximale d'accommodation de 5 dioptries

E- Emmétrope ayant perdu toute faculté d'accommodation.

Propositions :

1- l'infini.

2- 1 m.

3- 0,50 m

4- 0,20 m.

5- 0,1 à m.

II- Quelles sont les caractéristiques des lentilles qui permettent la correction de la vision de ces sujets :

a- à l'infini.

b- à 33 cm.

Test 21

Parmi les sujets suivants :

A- Emmétrope ayant une amplitude maximale d'accommodation de 5 dioptries.

B- Myope de 2 dioptries ayant une amplitude maximale d'accommodation de 3 dioptries.

C- Hyperope de 1 dioptrie âgé de 80 ans.

D- Hyperope de 1 dioptrie ayant une amplitude maximale d'accommodation de 6 dioptries.

E- Emmétrope âgé de 80 ans.

F- Myope de 5 dioptries ayant une amplitude maximale d'accommodation de 7 dioptries.

G- Hyperope de 2 dioptries ayant une amplitude maximale d'accommodation de 7 dioptries.

Quels sont ceux qui peuvent voir distinctement, sans correction, tous les points situés à une distance comprise entre 20 et 50 cm (limites incluses).

Test 22

Préciser, en justifiant à chaque fois la réponse, les limites du champ réel de vision nette des sujets suivants :

A- Myope de 5 dioptries âgé de 80 ans.

B-Hyperope de 4 dioptries ayant une amplitude maximale d'accommodation de 8 dioptries.

C- Myope de 2 dioptries ayant une amplitude maximale d'accommodation de 10 dioptries.

D- Emmétrope âgé de 80 ans.

E- Emmétrope ayant une amplitude maximale d'accommodation de 5 dioptries.

F- Hyperope de 2 dioptries âgé de 80 ans.

G- Myope de 2 dioptries **corrigé** ayant une amplitude maximale d'accommodation de 10 dioptries.

Test 23

Un sujet âgé de 60 ans peut lire à une distance de 30 cm sans verres correcteurs. Par contre, pour conduire sa voiture, il doit porter des verres sphériques divergents de 3 dioptries.

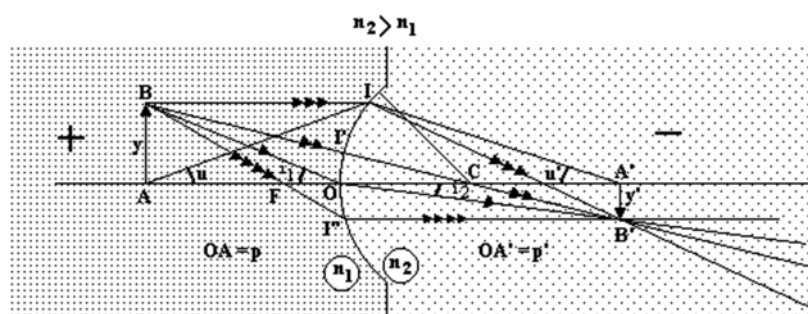
Quels sont la nature et le degré approximatif de son amétropie ?

Test 24

On considère le dioptré sphérique de la figure suivante :

les angles i_1 et i_2 sont petits de telle sorte que $\sin i_1 \approx i_1$ et $\sin i_2 \approx i_2$
 les angles u et u' sont petits de telle sorte que $\tan u \approx \sin u$ et $\tan u' \approx \sin u'$

1- Montrer que le grandissement : $\frac{y'}{y} = \frac{n \cdot p'}{n' \cdot p} = \frac{n \cdot \sin u}{n' \cdot \sin u'}$



2- Soit la formule du dioptré sphérique : $\frac{n}{p} - \frac{n'}{p'} = \frac{n-n'}{R} = D$ = puissance du dioptré

Montrer que dans le cas où $|p| \gg |p'|$, on a : $\frac{y'}{y} = \frac{n}{n'-n} \cdot \frac{R}{p} = - \frac{n}{D \cdot p}$

3- Un œil emmétrope (à vision normale), dont l'accommodation est paralysée, est assimilé à un dioptré sphérique d'indice de réfraction $4/3$ pour une radiation jaune ($\lambda_j = 570 \text{ nm}$)

a- Calculer la puissance de l'œil en dioptries (m-1)

On donne : Rayon du dioptré sphérique équivalent = $5,6 \text{ mm}$

indice de réfraction : $n_j = 4/3$

indice de réfraction de l'air $n = 1$

b- Calculer les dimensions de l'image rétinienne d'un sujet de $1,80 \text{ m}$ vu à 20 m par un œil emmétrope (l'écran étant la rétine).

Test 25

Le dioptré équivalent à l'œil d'un sujet a un rayon de courbure dans le plan horizontal de **$5,5 \text{ mm}$** . Le rayon de courbure dans un plan vertical est de **$5,7 \text{ mm}$** .

Calculer la puissance de ce dioptré sphérique ?

On donne la formule du dioptré sphérique : $\frac{n}{p} = \frac{n'}{p'} = \frac{n-n'}{R} = D$

* indice de réfraction de l'eau : **$n = 4/3$** (pour une lumière jaune $\lambda_j = 570 \text{ nm}$)

Test 26

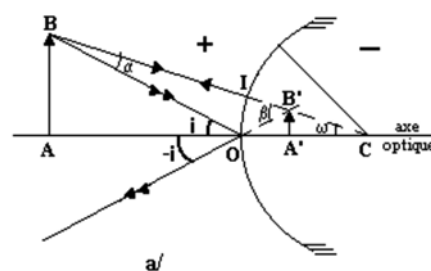
La figure suivante donne la construction de l'image d'un objet donnée par un miroir sphérique convexe.

1- Retrouver la formule du miroir sphérique à partir de celle du dioptré sphérique en prenant $n' = -n = -1$. en déduire que les foyers F et F' sont confondus.

On donne la formule du dioptré sphérique : $\frac{n}{p} = \frac{n'}{p'} = \frac{n-n'}{R} = D$ avec : $\frac{n}{f} = \frac{n'}{f'}$

2- Montrer que dans le cas où $p \gg p'$ que le grandissement est : $g = \frac{y'}{y} = -\frac{R}{2p}$

3- En regardant la cornée d'un sujet à 10 cm avec une lampe de poche de 5 cm de diamètre, on voit apparaître, par réflexion, une image de 2 mm de diamètre. Quel est l'ordre de grandeur du rayon de courbure de la face antérieure de la cornée ?



4- Chez un autre sujet, l'image d'un objet circulaire, après réflexion sur la cornée, est une ellipse à grand axe horizontal. Que peut-on conclure ?

Test 27

Soit un sujet dont le rayon de courbure du dioptré équivalent est normal, dans un plan horizontal, tel que $R_H = 5,5 \text{ mm}$. Le rayon est $R_V = 5,7 \text{ mm}$ dans un plan vertical.

1- Quelle est la nature de l'amétropie du sujet ?

2- Quelles sont la nature et la puissance du verre à utiliser pour corriger cette amétropie ?

Test 28

Le dioptré équivalent d'un œil myope a une distance focale image $f' = 20 \text{ mm}$, la rétine se trouvant sur l'axe optique à 2 mm.

1- Tracer le cheminement d'un faisceau parallèle à l'axe, de 4 mm de diamètre, qui traverse ce dioptré équivalent

2- Le faisceau transmis coupe la rétine suivant une surface :

* Comment s'appelle cette intersection ?

* Quelles sont ses dimensions ?

3- Que deviendrait cette intersection dans le cas :

* d'un œil emmétrope ?

* d'un œil astigmat myopique simple conforme à la règle ?

* d'un œil astigmat hyperopique simple conforme à la règle ?

* d'un œil astigmat myopique simple non conforme à la règle ?

Test 29

Un œil astigmat est assimilé à un dioptré d'indice $4/3$, dont les rayons de courbure sont : $R_v = 5,55 \text{ mm}$ dans un plan vertical et $R_h = 5,60 \text{ mm}$ dans un plan horizontal.

1- Calculer D_v et D_h , les puissances des dioptrés vertical et horizontal.

2- Calculer le degré d'astigmatisme $DD = D_v - D_h$.

3- L'astigmatisme est-il ou non conforme à la règle ?

4- Quelle donnée supplémentaire faudrait-il fournir pour que l'on puisse décider si l'astigmatisme est simple ou composé, myopique ou hyperopique.

Test 30

Un œil astigmat est assimilé à un dioptré d'indice $4/3$, dont les rayons de courbure sont : $R_v = 5,0 \text{ mm}$ dans un plan vertical et $R_h = 5,1 \text{ mm}$ dans un plan horizontal.

1- Calculer les puissances principales et le degré d'astigmatisme. On pourra utiliser la relation approchée $1/(1+x) = 1-x$ quand x est petit devant 1.

2- L'astigmatisme est-il ou non conforme à la règle ?

3- Quelles devraient être les distances de la rétine au sommet du dioptré pour qu'il s'agisse d'un astigmatisme simple ?

4- Comment peut-on alors corriger ce sujet ?

Test 31

On observe chez un sujet que :

- a- l'image d'un objet circulaire après réflexion sur la cornée est une ellipse à grand axe horizontal.
- b- Ce sujet voit distinctement sans accommoder une droite verticale située à l'infini.

1- Comparer les rayons de courbure du dioptré cornéen antérieur.

2- Quelle est la variété d'astigmatisme du sujet ?

3- Comment corriger cet astigmatisme dont le degré d'astigmatisme est de 3 dioptries.

Test 32

Un sujet observant une étoile voit net une droite verticale. De quel type d'amétropie s'agit-il ?

Test 33

Un sujet observant une étoile voit net une droite verticale. En la fixant, il arrive à la voir sous la forme d'une droite horizontale. Quelle est la variété d'astigmatisme de ce sujet ?

Test 34

Comment les sujets suivants voient-ils un cadran horaire placé à 5 m.

1- Myope de 3 dioptries âgé de 25 ans.

2- Hyperope de 2 dioptries âgé de 25 ans.

3- Astigmatisme hyperopique simple conforme à la règle.

4- Astigmatisme myopique simple conforme à la règle.

Test 35

Un sujet porteur d'un astigmatisme régulier myopique de degré égal à 3 dioptries.

1- Quand il plonge la tête dans l'eau, les yeux ouverts, on constate alors que son astigmatisme a disparu et qu'une autre amétropie est apparue. Expliquer de quelle amétropie il s'agit? Justifier la réponse sachant que le cristallin de l'œil a une puissance de 20 dioptries.

2- En est-il de même si le sujet portait un masque ?

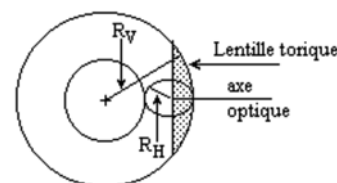
Test 36

Comment corriger un astigmatisme de degré est de 3 dioptries hyperopique simple conforme à la règle.

Test 37

On considère une lentille mince torique convergente plan-convexe, les rayons de courbure sont tels que : $R_{1V} = R_{1H} = \infty$; et $0 < R_{2V}$ différent de $R_{2H} < \infty$.

1- Exprimer les puissances D_V et D_H de la lentille mince torique convergente.



2- Peut-on considérer la lentille torique mince comme la superposition de deux lentilles minces cylindriques accolées à axes perpendiculaires.

on rappelle la formule des lentilles minces :

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = (n-1) \left[\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right] = -\frac{1}{f'} = \frac{1}{f}$$

Test 38

La vision d'un sujet a été exactement corrigée par un ensemble de deux lentilles superposées :

- * une lentille sphérique convergente de 2 dioptries.
- * une lentille cylindrique convergente de 1 dioptrie à génératrice verticale.

1- Quelle est la variété d'astigmatisme de ce sujet ?

2- Peut-il être corrigé par une autre combinaison de lentille sphérique et cylindrique ?

3- En pratique, quel genre de lentille utilise-t-on ?

Test 39

La vision d'un sujet a été exactement corrigée par :

- * une lentille sphérique convergente de 1 dioptries.
- et * une lentille cylindrique divergente de 2 dioptries à génératrice horizontale.

1- Quelle est la variété d'astigmatisme de ce sujet ?

2- Peut-il être corrigé par une autre combinaison de lentille sphérique et cylindrique ?

3- En pratique, quel genre de lentille utilise-t-on ?

Test 40

La vision d'un sujet a été exactement corrigée par un ensemble de deux lentilles superposées :

- * une lentille sphérique divergente de 2 dioptries.
- * une lentille cylindrique divergente de 1 dioptrie à axe horizontal.

1- Quelle est la variété d'astigmatisme de ce sujet ?

2- Peut-il être corrigé par une autre combinaison de lentille sphérique et cylindrique ?

3- En pratique, quel genre de lentille utilise-t-on ?

Test 41

La vision d'un sujet a été exactement corrigée par un ensemble de deux lentilles superposées :

- * une lentille sphérique convergente de 1 dioptries.
- * une lentille cylindrique divergente de 1 dioptrie à axe horizontal.

1- Quelle est la variété d'astigmatisme de ce sujet ?

2- Peut-il être corrigé par une autre combinaison de lentille sphérique et cylindrique ?

Test 42

Soit un sujet astigmatique régulier hyperopique simple conforme à la règle de 2 dioptries.

1- Quelle lentille doit-on utiliser pour corriger ce sujet ?

2- Que deviendra cet astigmatisme après paralysie de l'accommodation ?

3- Comment ce sujet peut-il voir une étoile, le soir dans les deux cas suivants ?

a/ sans correction.

b/ avec sa correction de la première question à laquelle on aura ajouté une lentille convergente de 3 dioptries.

Test 43

Un sujet emmétrope a eu sa cornée brûlée au cours d'un accident.

1- Quel type d'amétropie probable aura ce sujet :

- * sphérique ?
 - * non sphérique ?
-

2- Par quoi peut-on le corriger ?

LA SENSATION VISUELLE

I- INTRODUCTION A L'OPTIQUE PHYSIOLOGIQUE

L'optique physiologique a pour objet l'étude du fonctionnement de la rétine et des voies nerveuses qui lui font suite. Cette étude relève donc :

- a- de la photophysique et de la photochimie qui précisent les conditions et les mécanismes d'absorption de la lumière par les groupes chromophores des pigments contenus dans les photorécepteurs de la rétine ;
- b- de l'électrophysiologie cellulaire élémentaire qui met en évidence les processus biophysiques qui conduisent de l'absorption de photons à la genèse de potentiels d'action ;
- c- de la théorie du codage de l'information qui doit élucider comment l'information visuelle est traitée et transmise, par les voies et centres nerveux optiques.

Dans ce chapitre préliminaire, nous aborderons successivement : des notions succinctes sur l'organisation de la rétine, les principales sources de lumière, une première approche de la physiologie rétinienne qui nous fera appréhender le concept fondamental de trivariance visuelle

II- STRUCTURE DE LA RÉTINE

II-1-

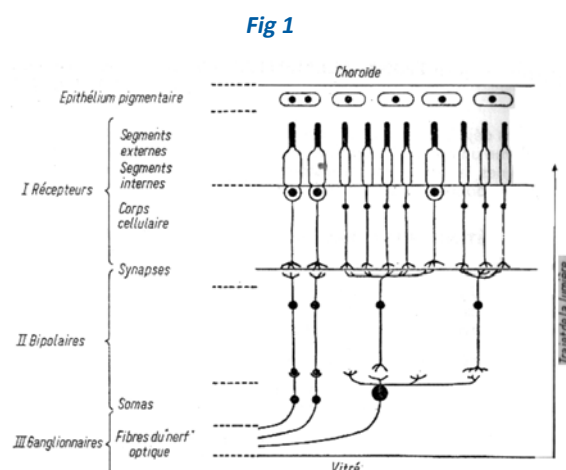
La figure 1 donne une coupe schématique de la rétine. On distingue différentes couches :

a- Couche I ; on y trouve les organes récepteurs : les cônes et les bâtonnets.

b- Couche II ; on y trouve les cellules bipolaires équivalant aux premiers neurones ; Un deuxième neurone dont le soma est appelé cellule ganglionnaire, et dont la fibre conduit l'influx au corps géniculé externe après avoir subi la décussation au niveau du chiasma.

c- Couche III ; on y trouve un troisième neurone reliant le corps géniculé au cortex occipital.

La figure montre aussi que, pour parvenir aux récepteurs, la lumière doit traverser les deux couches de cellules nerveuses.



II-2- LES DEUX TYPES DE CELLULES RÉCEPTRICES:

On distingue deux types de photorécepteurs dans la couche la plus externe de la rétine : les cônes et les bâtonnets. Les photorécepteurs établissent avec les bipolaires des liaisons synaptiques tout à fait classiques.

II-3- LES ZONES DE LA RÉTINE :

La répartition des cônes et des bâtonnets permet de distinguer dans la rétine une région centrale et une région périphérique.

II-3-1- LA RÉTINE CENTRALE.

La partie centrale de la fovéa, de 1,2 mm de diamètre et de diamètre apparent inférieur à 5 °, est une petite dépression due au fait à l'existence uniquement de photorécepteurs en cet endroit. Les bipolaires et les ganglionnaires sont en effet rejetées latéralement. Dans la partie la plus centrale, de 0,3 à 0,4 mm de diamètre et de diamètre apparent de l'ordre de 1 °, il n'y a que des cônes ; ils y sont en nombre d'environ 35 000. Dans la partie périphérique de la fovéa, les bâtonnets sont mêlés aux cônes.

Dans la région parafovéale (1,25 mm de diamètre) et périfovéale (2,75 mm de diamètre), la densité des cônes y décroît très vite.

II-3-2- LA RÉTINE PÉRIPHÉRIQUE.

Dans cette partie de la rétine, il y a une prédominance de bâtonnets, car la densité des cônes continue à décroître.

III- LA TRIVARIANCE VISUELLE.

On distingue dans la perception d'une lumière trois qualités physiologiques. En effet, l'effet sur la rétine d'un stimulus lumineux peut être caractérisé par trois variables seulement (contrairement au son, où la possibilité qu'à l'oreille de faire l'analyse harmonique d'un son complexe nécessite la connaissance de l'infinité de variables qui représentent la composition spectrale du son).

Cette propriété physiologique essentielle de la rétine est connue sous le nom de trivariance visuelle. Les trois qualités physiologiques sont :

- **l'« intensité »** qui correspond au fait que toute source lumineuse (primaire ou secondaire) paraît plus ou moins brillante, indépendamment de sa couleur. C'est la seule qualité perçue en « vision nocturne (où la rétine est univariante).
- **la tonalité ou teinte** : c'est la qualité qui fait qu'une lumière est à proprement parler perçue colorée. On verra que même une lumière non monochromatique peut être caractérisée par une longueur d'onde. C'est la grande différence avec l'acoustique.
- **la saturation** : c'est la qualité qui fait distinguer un rose d'un rouge par exemple. Une couleur non saturée peut être considérée comme plus ou moins lavée de blanc.

Les deux dernières sont les qualités chromatiques, elles se rapportent à la couleur et jouent donc un rôle distinct de la première qui peut exister seule indépendamment des deux autres. Par exemple, une source est caractérisée uniquement par son intensité en vision nocturne ou chez certains sujets très rares qui sont insensibles à la couleur.

Nous étudierons d'une part, l'intensité physiologique et les problèmes qui s'y rattachent, et la colorimétrie où interviennent la tonalité et la saturation d'autre part.

LA SENSIBILITE DE L'ŒIL A L'INTENSITE PHYSIOLOGIQUE DE LA LUMIERE

A- LA LUMINANCE.

La **sensation** de l'œil à la quantité de lumière est la **qualité sensorielle** qui permet de dire à un observateur si une source lumineuse lui paraît plus ou moins brillante indépendamment de sa couleur.

PIERON nomme cette qualité sensorielle **phanie**. Pour définir de façon précise une qualité sensorielle, il faut étudier les « **stimuli équivalents** » correspondants qui sont des grandeurs où l'égalité a été définie par une expérience sensorielle, mais où l'addition ne s'introduit que par la grandeur physique correspondante.

Le « **stimuli équivalent** » correspondant à la qualité sensorielle phanie est la **luminance** (brillance visuelle) qui n'est pas une qualité sensorielle proprement dite, c'est la **grandeur lumineuse** rattachée à la **brillance énergétique** d'une source lumineuse.

La photométrie visuelle permet d'obtenir, expérimentalement, l'égalité de luminance de deux sources.

I- PHOTOMÉTRIE VISUELLE.

L'œil est un **récepteur sélectif**, il n'a pas la même sensibilité pour toutes les longueurs d'onde. La première condition pour effectuer correctement la photométrie visuelle est d'**étalonner ce récepteur sélectif par rapport aux grandeurs énergétiques** mesurées avec un récepteur neutre.

Considérons un récepteur sélectif inerte, tel qu'une cellule photo-électrique par exemple, et un récepteur neutre.

Le **rapport des réponses** de ces deux récepteurs en fonction de la longueur d'onde fournit la **courbe de sensibilité** du récepteur sélectif inerte.

Mais il est impossible de procéder ainsi pour l'œil, car la **sensation visuelle n'est pas directement mesurable**. L'œil ne peut que constater l'égalité ou rendre compte de l'inégalité des sensations.

Le problème est encore compliqué par la **sensation de couleur** qui se superpose à la sensation de luminosité proprement dite. Par contre, pour le même phénomène, on obtient une réponse en utilisant un récepteur inerte. On enregistre un courant avec une cellule photo-électrique et un noircissement avec un appareil photographique.

Il est donc nécessaire de procéder à cette étude par étapes.

I-1- PHOTOMÉTRIE HOMOCHROME.

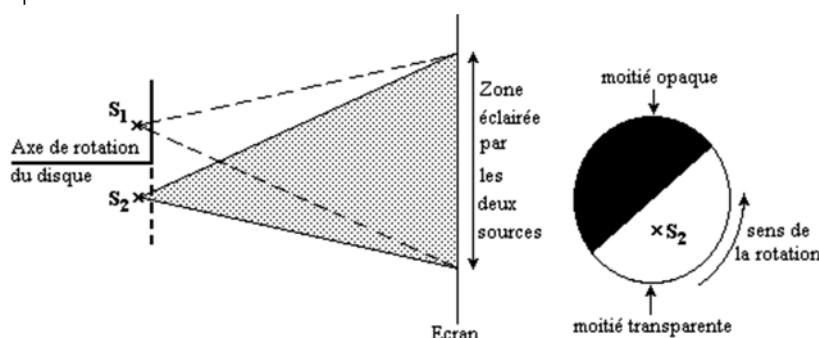
L'expérience montre que **deux plages lumineuses juxtaposées**, émettant **une lumière monochromatique de même longueur d'onde** ou plus généralement, de même composition spectrale, donc de même couleur, ont un aspect identique pour l'œil lorsque leurs **brillances énergétiques sont égales**. C'est donc la luminance, grandeur visuelle rattachée à la brillance énergétique, qui sera la grandeur fondamentale en photométrie visuelle, alors que le flux énergétique (**brillance énergétique**) l'était en radiométrie.

Cette égalité de luminance de deux plages peut aussi être appréciée en comparant, non plus deux plages juxtaposées, mais une **même plage** éclairée **successivement par deux faisceaux** de même composition spectrale, mais de brillance énergétique éventuellement différente.

Remarque : on admettra que, pour une source de lumière donnée, la luminance est proportionnelle à brillance énergétique ; ou $L = K \cdot B$

Ces dispositifs, qui permettent d'obtenir l'égalité de luminance de deux sources, sont des **photomètres** (ou **flicker**). Celui où une même plage est éclairée successivement par deux faisceaux est un **photomètre à papillotement**. Avec un tel dispositif, on peut réaliser l'expérience suivante :

Fig 2



Les sources lumineuses **S₁** et **S₂** sont telles qu'on peut faire varier leur brillance énergétique en faisant varier leur tension d'alimentation par exemple ou en plaçant devant elles des filtres neutres qui diminuent la quantité de lumière sans en changer la composition spectrale. Ces deux faisceaux se succèdent à une certaine cadence dont on peut faire varier la valeur.

- Si la **cadence est faible** : 1 par seconde par exemple, on distingue parfaitement que l'écran est éclairé tantôt par **S₁**, tantôt par **S₂**, et ceci reste vrai tant que la cadence est inférieure à 6 s^{-1} ; dans ce cas on parle de **succession**.
- Si la **cadence est élevée** : supérieure à 10 s^{-1} , les impressions visuelles causées par les deux plages successives sont fondues en une seule; dans ce cas on parle de **fusion**.
- Si la **cadence est comprise entre 6 et 10 s^{-1}** , on se trouve dans un cas intermédiaire intéressant, pour lequel les plages successives ne sont perçues, ni distinctes, ni fusionnées, mais une impression spéciale dite de **papillotement** a lieu.

Dans ce cas, on remarque que cette impression de papillotement diminue lorsque l'une des brillances énergétiques des deux sources tend vers celle de la deuxième; et il y a **disparition complète du papillotement lorsque les deux brillances sont égales**.

Au total, en photométrie homochrome, il y a **disparition du papillotement** à :

- * L'égalité des brillances énergétiques : $B_1 = B_2$
- et à : * l'égalité des luminances : $L_1 = L_2$

I-2- PHOTOMÉTRIE HÉTÉROCHROME. $I_1 \neq I_2$

On se place dans les conditions suivantes : $I_1 \neq I_2$ et $B_1 = B_2$; on fait tourner le disque à une cadence comprise entre **6** et **10**. On constate la réapparition du papillotement.

On peut faire disparaître le papillotement en agissant sur l'une des brillances énergétiques **B₁** ou **B₂**. Si, à la disparition du papillotement on arrête le disque, on remarque qu'on a la même sensation de luminosité lorsque l'écran est éclairé par **S₁** ou par **S₂**. On conclut qu'à la disparition du papillotement on a,

- l'égalité des luminances $L_{\lambda_1} = L_{\lambda_2}$ auquel cas,
- les **brillances énergétiques sont différentes** $B_{\lambda_1} \neq B_{\lambda_2}$.

Comme la luminance est proportionnelle à la brillance énergétique, on a :

$$L_{\lambda_1} = K \cdot B_{\lambda_1} \quad (1)$$

$$\text{et} \quad L_{\lambda_2} = K \cdot B_{\lambda_2} \quad (2)$$

Sachant que $B_{\lambda_1} \neq B_{\lambda_2} \rightarrow K \cdot B_{\lambda_1} \neq K \cdot B_{\lambda_2}$, Ce qui donnerait $L_{\lambda_1} \neq L_{\lambda_2}$.

Or les luminances sont égales. Pour rétablir cette égalité, on doit multiplier les deuxièmes membres des relations (1) et (2) par des coefficients différents V_{λ_1} et V_{λ_2} . Le coefficient est par définition le coefficient d'efficacité lumineuse de la lumière de longueur d'onde λ , on a donc :

$$L_{\lambda_1} = K \cdot V_{\lambda_1} \cdot B_{\lambda_1}$$

$$\text{et} \quad L_{\lambda_2} = K \cdot V_{\lambda_2} \cdot B_{\lambda_2};$$

$$\text{ce qui donne : } \frac{L_{\lambda_1}}{L_{\lambda_2}} = 1 = \frac{V_{\lambda_1}}{V_{\lambda_2}} \cdot \frac{B_{\lambda_1}}{B_{\lambda_2}} \quad \text{d'où : } \frac{V_{\lambda_1}}{V_{\lambda_2}} = \frac{B_{\lambda_2}}{B_{\lambda_1}}$$

$$\frac{V_{\lambda_1}}{V_{\lambda_2}}$$

est le coefficient relatif d'efficacité lumineuse de la lumière de longueur d'onde λ_1 par rapport à celui de la lumière de longueur d'onde λ_2 , ce rapport s'exprime en fonction de grandeurs physiques donc mesurables.

I-3- NÉCESSITÉ D'AVOIR UNE RÉFÉRENCE.

On peut, en associant les lumières monochromatiques deux par deux, exprimer les valeurs des coefficients relatifs d'efficacité lumineuse des uns par rapport aux autres. On remarque que : n'importe quelle lumière de longueur d'onde λ associée

au jaune donne un coefficient $\frac{V_{\lambda}}{V_J} = \frac{B_J}{B_{\lambda}} < 1$. Cela veut dire que la lumière jaune $\lambda_J = 555 \text{ nm}$ est celle qui a l'efficacité lumineuse la plus grande.

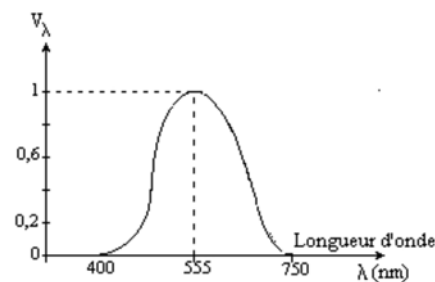
- En prenant comme **référence** l'efficacité lumineuse du jaune et
- en la **posant égale à 1**,

on peut définir, pour chaque lumière de longueur d'onde donnée, une valeur de l'efficacité lumineuse qui sera inférieure à 1. Les courbes expérimentales (Fig 3) donnent la variation du coefficient d'efficacité lumineuse en fonction de la longueur d'onde.

Ainsi, pour une lumière donnée, de longueur d'onde λ , de brillance énergétique B_λ , et de coefficient d'efficacité lumineuse V_λ , la relation qui lie la brillance énergétique (grandeur physique) à la brillance **lumineuse** ou luminance (grandeur physiologique) est la suivante : $L_\lambda = K \cdot V_\lambda \cdot B_\lambda$;

dans cette expression, la valeur et l'unité de K sont fonction de L_λ .

Fig 3



II- LES GRANDEURS PHOTOMÉTRIQUES.

II-1- LA LUMINANCE

Les grandeurs lumineuses ou visuelles sont distinctes des grandeurs énergétiques, et l'adjectif « lumineux » ou « visuel » doit, en toute rigueur, leur être associé.

La loi d'**Abney** montre que, dans le cas d'un spectre complexe où interviennent de nombreuses longueurs d'onde, les luminances jouissent de la **propriété d'additivité**. Cette loi peut être vérifiée expérimentalement au photomètre à papillement. La luminance totale L s'écrit :

$$L = K \cdot \sum V_\lambda \cdot B_\lambda \quad \text{pour un spectre de raies}$$

$$\text{Et} \quad L = K \cdot \int V_\lambda \cdot B_\lambda \cdot d\lambda \quad \text{pour un spectre continu.}$$

II-2- AUTRES GRANDEURS PHOTOMÉTRIQUES :

Une fois la luminance rattachée aux grandeurs énergétiques, les autres grandeurs photométriques en dérivent par les mêmes relations qui rattachent à la brillance énergétique, les grandeurs énergétiques correspondantes

II-2-1- L'intensité lumineuse I est reliée à la luminance L d'un élément de surface ds , dont la normale fait avec les rayons un angle α par la relation :

$$dI = L \cdot ds \cdot \cos \alpha.$$

II-2-2- Le flux lumineux F est lié à l'intensité I et à l'angle solide Ω par la relation :

$$dF = I \cdot d\Omega.$$

II-2-3-L'éclairement lumineux E , c'est la densité surfacique du flux :

$$E = \frac{dF}{dS}$$

II-3- LES UNITÉS PHOTOMÉTRIQUES:

On peut rassembler l'ensemble d'unités radiométriques (physiques), leurs unités, les unités photométriques correspondantes et leurs unités dans le tableau suivant :

Grandeurs physiques		Grandeurs physiologiques	
Grandeur	Expression et unités	Grandeur	Expression et unités
Brillance énergétique : B_λ	$B_\lambda = \frac{\Phi}{S \cdot \Omega}$ en Watt.stéradian ⁻¹ .m ⁻²	Brillance lumineuse Ou Luminance : L	$L_\lambda = K \cdot V_\lambda \cdot B_\lambda$ en Nit
Intensité énergétique : J	$J = \frac{\Phi}{\Omega}$ En Watt.stéradian ⁻¹ .	Intensité lumineuse	$I = L \cdot S$ En Candela
Flux énergétique : f	En Watt	Flux lumineux : F	$dF = I \cdot d\Omega$ en Lumen
Eclairement énergétique E	$E = \frac{\Phi}{S}$ En Watt.m ⁻²	Eclairement lumineux E	$E = \frac{F}{S}$ en Lux

C'est en vision **diurne** ou **photopique** que l'œil est capable d'apprécier les couleurs. La limite inférieure de la luminance en vision photopique est de l'ordre de 6 à 10 nits. Dans ce cas la constante K est la même pour toutes les longueurs d'onde ; elle est égale à :

$$K = 683 \text{ Lumen.Watt}^{-1}.$$

II-4- ORDRE DE GRANDEUR DE QUELQUES LUMINANCES.

Ciel nocturne étoilé sans lune : 5.10^{-4} nit

Ciel nocturne étoilé en pleine lune : 2.10^{-2} nit

Terre labourée à midi en lumière du jour : 1300 nit

Disque solaire : $1,5.10^9$ nit

Il faut remarquer que dès que la luminance devient inférieure à 10 nits, la sensibilité spectrale de l'œil se déplace vers les courtes longueurs d'onde. C'est **le phénomène depurkinje**. Aux faibles luminances, le système d'unités photométriques est toujours défini, mais n'a plus de relation avec les sensations éprouvées par le sujet ; il perd ainsi beaucoup de son intérêt.

III- LE PHÉNOMÈNE DE PURKINJE.

Purkinje (prononcer Pourkinié) a remarqué que les poteaux-frontière peints en bleu et rouge paraissent :

- * pendant la journée, de même luminance.
- * la nuit, les parties peintes en bleu paraissent plus lumineuses que celles en rouge lesquelles semblent presque noires.

On peut mettre en évidence l'effet **Purkinje** en réalisant l'expérience suivante :

Dans une chambre noire, un observateur regarde deux plages juxtaposées, une rouge et une bleue, elles paraissent de même luminance (100 nits) en vision photopique. Si on interpose entre l'observateur et les deux plages, des écrans neutres qui atténuent progressivement les brillances énergétiques, les luminances diminuent progressivement, mais celle du rouge diminue plus vite ; lorsque est très importante, la plage rouge n'est plus perçue, alors que la bleue garde une certaine luminance, mais elle n'est plus perçue colorée en bleu.

Ce phénomène de **Purkinje** permet donc de distinguer trois domaines de vision.

- * Le domaine de la vision **diurne** ou **photopique**, où la luminance est supérieure à 10 nits. La courbe d'efficacité lumineuse est stable et se rapproche de celle de l'« observateur moyen » (figure 4 : courbe en trait plein). Dans ce domaine de vision, pour une longueur d'onde donnée, la luminance est proportionnelle à la brillance énergétique $L_\lambda = K \cdot V_\lambda \cdot B_\lambda$; où la valeur de la constante K est parfaitement définie : $K = 663 \text{ Lumen.Watt}^{-1}$.
- * Le domaine de la vision **crépusculaire** ou **mésopique**, pour des luminances comprises entre 10^{-3} et 10 nits, où la sensibilité de l'œil en fonction de la longueur d'onde dépend de la luminance. À ce stade, la sensation colorée persiste. La lumière blanche est presque bleutée, car la sensibilité au rouge est très diminuée. C'est pour cette raison que les metteurs en scène éclairent en bleu leurs décors et personnages pour donner l'illusion du soir.
- * Le domaine de la vision nocturne ou scotopique, où la luminance est inférieure à 10^{-3} nit. La sensation colorée disparaît, et la courbe d'efficacité lumineuse est de nouveau stable (Stiles et Smith). Cette courbe est décalée vers les petites longueurs d'onde, son maximum se situe vers 510 nm (courbe en pointillés de la figure 4), et la sensibilité au rouge est pratiquement nulle.

Dans ce domaine de vision, pour une longueur d'onde donnée, la luminance est proportionnelle à la brillance énergétique :

$$L_\lambda = K \cdot V_\lambda \cdot B_\lambda ;$$

où la valeur de la constante K est parfaitement définie :

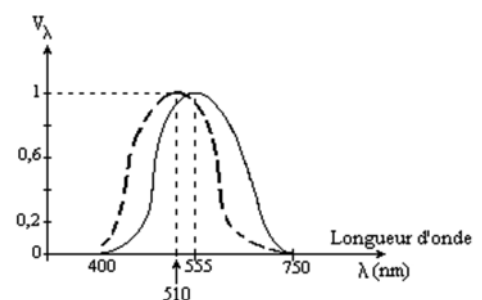
$$K = 1746 \text{ Lumen.Watt}^{-1}.$$

Certaines **conditions** sont nécessaires en vision **scotopique** :

- L'œil doit être parfaitement adapté à l'obscurité
- L'œil doit fixer centralement un point lumineux, et la luminance à étudier doit se projeter sur la rétine périphérique.

Ce déplacement des courbes d'efficacité lumineuse que constitue le phénomène de **Purkinje** est le premier argument, parmi beaucoup d'autres, que nous rencontrons en faveur d'une **dualité fonctionnelle des récepteurs rétiniens** : les cônes et les bâtonnets (Pirinaud et Von Kries). Les cônes fovéaux sont responsables de la vision diurne ou **photopique** ; les bâtonnets périphériques de la vision nocturne ou **scotopique**.

Fig 4



B- ÉTUDE DE L'ADAPTATION AU NIVEAU DE LA LUMINANCE.

La psychophysique classique, depuis **Fechner**, avait tenté d'introduire le second caractère nécessaire pour rendre une grandeur mesurable, à savoir : l'addition ou le rapport, en procédant de façon indirecte à partir des valeurs liminaires ou **seuils**. Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser à l'étude :

- d'abord du seuil absolu,
- puis du seuil différentiel.

I- ÉTUDE DU SEUIL ABSOLU D'ADAPTATION.

Il est bien connu qu'en passant d'un endroit bien éclairé à un endroit moins bien éclairé, on ne distingue pratiquement rien au début. Au bout d'un certain temps, on arrive à distinguer tout ce qui se trouve dans l'entourage. On dit qu'on s'est **adapté à l'obscurité**.

De même, en passant d'un endroit sombre à un endroit où la luminance est importante, l'œil nécessite du temps pour s'adapter ; mais cette adaptation est plus rapide.

La sensibilité de la rétine à la lumière et à sa composition spectrale dépend des stimulations qui ont précédé (à la fois de leur durée, de leur intensité et de leur composition spectrale).

I-1- DÉFINITION DU SEUIL ABSOLU.

On définit le seuil absolu comme étant la plus petite luminance susceptible d'être perçue par l'œil : c'est le **minimum perceptible**.

I-2- TECHNIQUE D'ÉTUDE.

L'œil du sujet à explorer regarde une plage dont la luminance mesurable est maintenue uniforme sur toute sa surface. Pour cette étude, on peut faire varier :

- l'angle sous lequel cette plage est vue en agissant sur la surface de la plage.
- la région de la rétine sur laquelle se forme l'image de cette plage.
- la couleur.

I-3- L'ADAPTATION À L'OBSCURITÉ.

Historique

Son étude est dominée par les travaux de **Hecht** et de son école.

Rappelons d'abord qu'outre son importance théorique, ce problème présentait un intérêt pratique immédiat en radioscopie (technique qui n'est plus utilisée) et que, compte tenu des résultats que nous allons exposer, il est indispensable d'attendre au moins une dizaine de minutes, lorsqu'on vient d'un endroit très éclairé, avant de tenter de voir quelque chose sur l'écran.

On sait en effet, que la sensibilité de l'œil à la luminance augmente beaucoup dans l'obscurité. Quand on passe d'un endroit très éclairé dans une pièce sombre, on commence par ne rien distinguer, puis, peu à peu, on arrive à reconnaître les objets environnants. Le photomètre permet d'étudier l'évolution du seuil d'excitation quand l'œil est maintenu pendant des durées croissantes dans l'obscurité après exposition à une forte luminance.

Pour réaliser cette étude, on procède comme suit :

L'œil du sujet est ébloui pendant un temps suffisamment long pour amener le seuil de tous ses récepteurs à une valeur très élevée (5000 nits par exemple) par un faisceau large, couvrant à la fois la fovéa et la rétine périphérique.

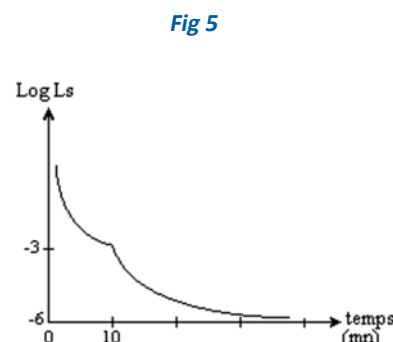
Puis on fait passer la plage à une luminance L_1 plus faible. Le sujet ne distingue rien au début, la plage lui paraît obscure ; puis au bout d'un temps t_1 , il voit cette plage. On note ce temps t_1 qui est appelé temps d'adaptation à l'obscurité, il correspond à la luminance seuil L_1 .

Dès que le sujet voit, on fait passer la luminance de la plage à une valeur L_2 plus petite que L_1 et on note la valeur de t_2 , à laquelle le sujet voit...

On construit ensuite, la courbe (Fig 5) de variation de la luminance seuil en fonction du temps d'adaptation à l'obscurité en coordonnées semi-logarithmiques. Cette courbe s'appelle la courbe d'adaptation à l'obscurité. Cette courbe présente une cassure appelée « cassure de **Hecht** »

I-3-1- La plage est éclairée en lumière blanche :

La courbe obtenue a l'allure de la figure 5 : cette courbe présente une cassure pour un temps de l'ordre de 8 à 10 mn qui la partage en :



- une phase initiale rapide, et
- une phase lente qui tend vers une valeur asymptotique de l'ordre de 10^{-6} nit

I-3-2- La plage est éclairée en lumière monochromatique :

La figure 6 donne les courbes d'adaptation obtenues pour différentes valeurs de la longueur d'onde. Il est à remarquer que :

- la cassure existe pour toutes les couleurs sauf pour le rouge.
- la cassure est d'autant plus précoce que la longueur d'onde est petite.
- La sensation colorée n'existe plus au-delà de la cassure.

I-3-3- La plage est étroite :

Le diamètre apparent de la plage est de 1° . L'image de la plage se formera :

- soit sur la fovéa, il s'agit d'une vision centrale ou fovéale.
- soit sur la rétine périphérique.
- Dans ce cas, on n'observe pas de cassure, mais deux courbes distinctes (Fig.7).

On constate que :

- la rétine centrale est plus sensible que la périphérie à forte luminance ; et beaucoup moins à faible luminance.
- La courbe fovéale est parfaitement superposable à la courbe « rouge » de la figure 6.

I-3-4- Interprétation des résultats :

Les résultats sont cohérents avec la théorie de la dualité rétinienne et avec le phénomène de Purkinje. Étant donné la répartition topographique des deux types de cellules sensorielles et leur sensibilité en fonction de la longueur d'onde, on obtient deux types de courbes.

Si la luminance est supérieure à 10^{-3} nit, elle intéresse les cônes leur adaptation est rapide avec un seuil de l'ordre de 10^{-3} nit (Fig 7).

La figure 7 montre également que la phase scotopique correspond à l'adaptation des bâtonnets, plus lente et progressant à mesure que le séjour à l'obscurité se prolonge

La figure 5, montre que dans le cas d'un test blanc et large, l'image de la plage se formant à la fois sur la fovéa et sur la rétine périphérique, la première partie de la courbe correspond à l'adaptation des cônes. Lorsque le seuil des cônes est atteint, les bâtonnets, pour lesquels le seuil est plus bas, sont adaptés à leur tour et donnent la deuxième partie de la courbe. La cassure correspond au passage de la courbe des cônes à celle des bâtonnets ; ces récepteurs ne participent pas à la vision des couleurs. Ils sont sensibles uniquement à la luminance, leur vision est **achromatique**.

La figure 6 montre que la sensibilité de la rétine périphérique aux couleurs n'est pas la même, et que le rouge n'est perçu que par les cônes

Fig 6

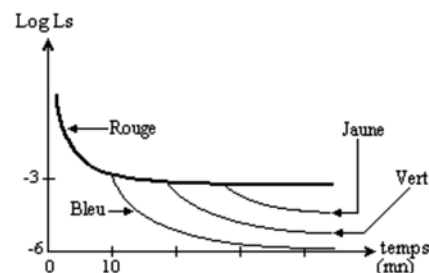
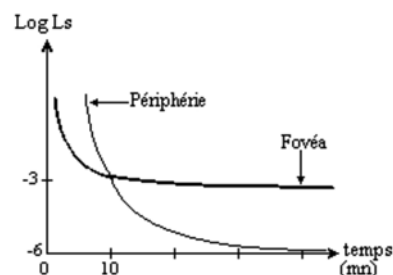


Fig 7



II- ÉTUDE DU SEUIL DIFFÉRENTIEL

II-1-DÉFINITION.

Le seuil différentiel **DL** est la plus petite variation perceptible de la luminance. Autrement dit, si avec un photomètre à plages juxtaposées, on fixe la luminance de l'une des plages à une valeur **L** puis on fait varier la luminance de la deuxième de **DL** jusqu'à ce qu'elle paraisse différente de **L**. Le seuil différentiel est la valeur liminaire (la plus petite) de **DL**.

On utilise le plus souvent la fraction différentielle $\frac{DL}{L}$, qui constitue en somme, le **seuil de contraste** qui règle la perception des objets se détachant sur un fond, et de façon plus générale, la reconnaissance des formes.

II-2- RÉSULTATS.

La loi de **Bouguer-Masson** (XVIII^e siècle) exprime que la fonction différentielle est une constante indépendante de l'intensité initiale.

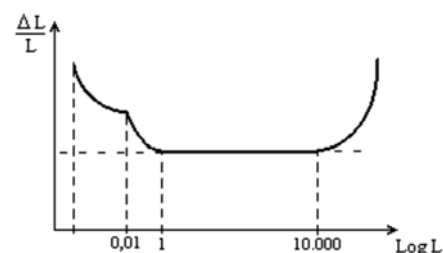
$$\frac{DL}{L} = \text{Constante}$$

D'où le nom de « constante différentielle » sous lequel on désigne parfois cette constante. Elle est égale à 0,01.

Cette loi n'est autre que la loi de **Weber** : $\frac{DS}{S} = \text{Constante}$, qui s'applique donc à la luminance.

- Cette loi n'est valable que pour les luminances moyennes, le seuil différentiel relatif $\frac{\Delta L}{L}$ n'est pas constant, il varie avec la luminance L pour les faibles, et pour les très fortes luminances. La Figure 8 donne la variation de $\frac{\Delta L}{L}$ en fonction de L .
- Du côté des luminances faibles, **Blackwell** trouve une cassure analogue à celle du seuil absolu ; c'est un argument en faveur de la dualité cônes-bâtonnets.
- Du côté des luminances élevées, on observe une augmentation de $\frac{\Delta L}{L}$.

Fig 8

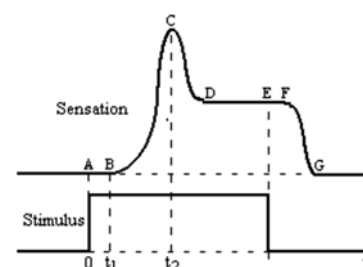


III- ÉTABLISSEMENT ET DISPARITION DE LA SENSATION.

On peut schématiser l'évolution de la sensation (son apparition et sa disparition) sous l'influence d'un stimulus « rectangulaire » (brusquement établi et brusquement interrompu) par la figure 9.

- La sensation commence avec un retard par rapport à la stimulation.
- Le passage par un maximum **C** est en relation avec le phénomène de **Broca-Sulzer**.
- Le palier **DE** correspond à la phase stable.
- La sensation subsiste (**EF**) lorsque le stimulus s'arrête (persistance des impressions lumineuses).
- Cette sensation disparaît progressivement de **F** à **G** (phase d'évanouissement).

Fig 9



Remarque :

Ces phénomènes subjectifs peuvent être recoupsés par des phénomènes objectifs (électrophysiologiques) tels que l'électrorétinogramme ou la fréquence des influx du nerf optique.

C- L'ACUITÉ VISUELLE

Lorsque, par exemple, nous regardons un paysage, nous en distinguons plus ou moins les détails suivant les conditions. Un arbre qui, pour un sujet donné sera reconnaissable par temps clair, ne le sera plus par temps brumeux ou au crépuscule. L'expérience montre que la perception des détails dépend de plusieurs facteurs, les plus importants sont :

- Le diamètre apparent du détail à percevoir.
- Sa forme géométrique.
- Son contraste par rapport au « fond », sur lequel il se détache.
- La luminance de ce fond.
- La luminance de l'entourage de ce « fond ».
- La durée de présentation de l'objet.
- L'endroit de la rétine où se forme son image.

I-DEFINITIONS

I-1- MINIMUM SÉPARABLE.

Un objet se présente sous un certain angle appelé diamètre apparent. Cet objet est perçu **net** si cet angle est supérieur à une valeur liminaire **a**. **a** est, par définition, le **minimum séparable** (à ne pas confondre avec le minimum perceptible, qui est le seuil liminaire de luminance). L'unité de mesure de cet angle est la **minute d'arc (a')**.

I-2- ACUITÉ VISUELLE

Le pouvoir séparateur de l'œil est d'autant meilleur que le détail juste discerné est petit. Donc, que l'angle sous lequel il est vu, est petit. On a introduit la notion d'acuité visuelle qui exprime ce pouvoir séparateur, elle se définit comme suit :

L'acuité visuelle (A.V) est l'inverse du minimum séparable a exprimé en minute d'arc. L'acuité visuelle s'exprime habituellement en dixièmes :

$$A.V = \frac{1}{a'}$$

Exemples : A un minimum séparable d'une minute, il correspond une acuité visuelle égale à l'unité soit : 10 / 10. Si le minimum séparable est de 0,5 minute (0,5') l'acuité visuelle est de 20 / 10, et si $a = 2'$, l'acuité visuelle est de 5 / 10.

Remarque : Nous supposerons par la suite que, la qualité optique des images rétinienne, est la meilleure possible, c'est le cas d'un sujet emmétrope ou amétrope corrigé, car, à une image rétinienne floue, ne peut correspondre qu'une mauvaise acuité visuelle.

II- VARIATIONS DE L'ACUITÉ VISUELLE.

Nous allons étudier la variation de l'acuité visuelle en fonction de chacune des variables prises séparément, toutes les autres sont supposées constantes.

II-1- FORME GÉOMÉTRIQUE DU TEST.

L'acuité visuelle dépend de la forme de l'objet examiné « baptisé optotype ».

La figure 10 donne la forme des optotypes les plus usuels :

A- ligne isolée.

B- point isolé.

C- mire de Foucault (barres parallèles, alternativement noires et blanches).

D- anneau de Landolt.

E- crochet de Snellen.

F- Lettre

Chacun de ces tests comporte une dimension caractéristique (marquée **s** sur la figure) du détail à reconnaître ; le rapport de **s** à la distance où est vu le test donnera le diamètre apparent de ce détail.

Toutes les valeurs des autres variables étant égales par ailleurs, l'acuité visuelle n'est pas la même pour tous les tests. Ainsi, pour un test noir sur fond blanc, une luminance du fond égale à celle de l'entourage de l'ordre de 1000 nits (donc largement photopique), la durée de présentation du test n'étant pas limitée, pour un même sujet en vision fovéale, l'acuité visuelle sera de : (voir tableau)

Test	Ligne isolée	Point isolé	Anneau de Landolt	Crochet De Snellen	Mire de Foucault	Lettre
Acuité visuelle	500/10	30/10	20/10	16/10	14/10	10

Remarque : Lorsqu'on donne la valeur de l'acuité visuelle d'un sujet, il est nécessaire de préciser la nature du test ainsi que les conditions de mesure (contraste, luminance...)

II-2- LUMINANCE DU FOND ET DE L'ENTOURAGE.

On entend par **le fond**, ce, sur quoi se détachent directement l'objet à regarder ou les figures de l'optotype utilisé ; l'entourage est la partie du champ visuel, le plus souvent beaucoup plus étendue, qui entoure le fond.

Autrement dit, lorsqu'on présente un optotype au sujet, avec un certain éclairage, on peut schématiser dans son champ visuel 3 types de sources secondaires ayant chacune une luminance déterminée.

- Le test lui-même (caractère à reconnaître)
- Le fond
- L'entourage.

Les travaux de Lythgoe (Fig 12) montrent que l'acuité visuelle est maximale quand la luminance de l'entourage est égale à celle du fond. En effet, lorsque la luminance de l'entourage devient supérieure à celle du fond, l'acuité visuelle baisse très vite, car il se produit alors le phénomène d'éblouissement. L'œil n'est plus adapté à la luminance du fond de l'optotype.

II-3- CONTRASTE.

On sait qu'un objet noir se détache mieux sur un fond clair, et inversement. L'acuité visuelle est liée au rapport des luminances de l'objet et du fond sur lequel il se détache.

On appelle **facteur de contraste**, le rapport de la différence des luminances de l'objet (ou du test) et du fond à la luminance du fond :

$$C = \frac{DL}{L}$$

Ainsi, pour un test noir sur fond blanc, le contraste est maximal et égal à 1. En réalité, pour les tests utilisés, le facteur de réflexion diffuse du noir n'est pas nul et le contraste n'est pas maximal, mais environ égal à 90% de sa valeur maximale. D'une façon générale, on exprime le contraste en % de sa valeur maximale.

Fig 10

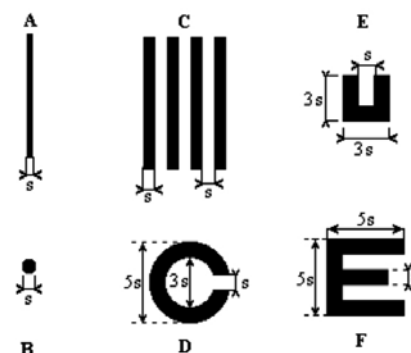


Fig 11

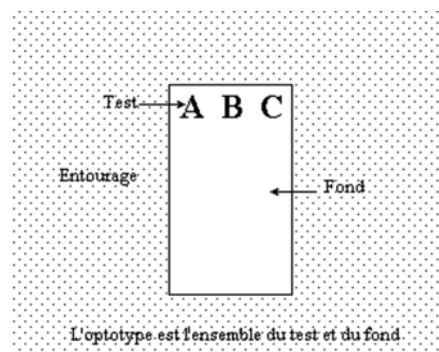
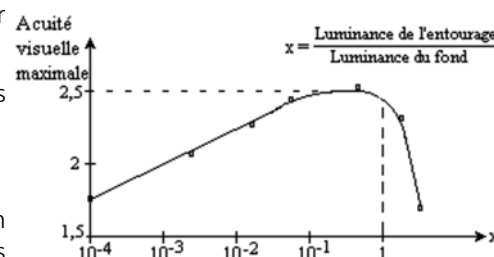


Fig 12



Remarque : Tous les résultats précédents se rapportaient à un contraste maximal.

Si le contraste baisse, l'acuité visuelle diminue et, à la limite, pour un contraste nul, l'acuité est nulle, puisque l'objet ne se distingue pas du fond. Remarquons que le plus petit contraste perceptible n'est autre que le seuil différentiel relatif de la luminance étudié dans la première partie de ce chapitre.

II-5- TOPOGRAPHIE RÉTINIENNE.

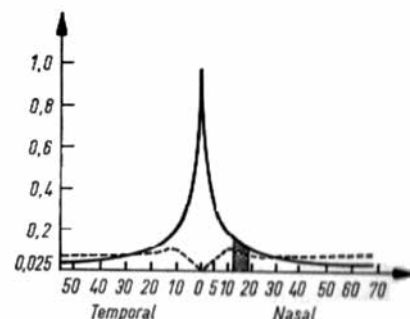
Jusqu'ici, sauf pour les luminances très faibles du fond et de l'entourage, nous avons supposé la vision fovéale. Or, toutes conditions égales par ailleurs, l'acuité visuelle varie avec le champ visuel.

La figure 13 donne la variation de l'acuité visuelle en fonction de l'angle (en degré) à partir du centre de la fovéa. La courbe en trait plein est celle des cônes, la courbe en pointillés est celle des bâtonnets (l'œil étant adapté depuis 20 minutes à l'obscurité). Du côté nasal, les courbes sont interrompues à la tache aveugle.

- En vision photopique, la courbe décroît très vite dès qu'on s'écarte de la fovéa.
- En vision scotopique, la fovéa est, on le sait, aveugle, l'acuité est nulle en son centre; elle est beaucoup plus faible qu'en vision diurne, elle passe par un maximum au voisinage du bord de la macula.

La figure 13 met en évidence, encore une fois, la dualité fonctionnelle des cônes et des bâtonnets.

Fig 13



EVALUATION FORMATIVE

Test 1

Sachant que le flux énergétique s'exprime en Watt, compléter le tableau :

Grandeurs physiques		Grandeurs physiologiques	
Grandeur	Expression et unités	Grandeur	Expression et unités
Brillance énergétique : B_l	$B_l = \frac{\Phi}{S \cdot \Omega}$ en	Brillance lumineuse Ou : L	$L_\lambda = K \cdot V_\lambda \cdot B_\lambda$ en
Intensité énergétique : J	J = En Watt.stéradian ⁻¹ .		I = En Candela
Flux énergétique : f	En Watt	Flux lumineux : F	dF = en Lumen
Eclairement énergétique E	E = En Watt.m ⁻²	 : E	$E = \frac{F}{S}$ en Lux

2- Calculer le flux lumineux qui entre dans l'œil d'un sujet, sachant que la source produit un éclairement de 100/p lux au niveau de la pupille (diamètre = 3 mm) de l'œil du sujet.

Test 2

Associer les grandeurs lumineuses suivantes :

a- Intensité lumineuse. b- Luminance c- Flux lumineux d- Éclairement lumineux.

A leurs unités :

e- Lux. f- Lumen g- Candela h- Nit.

Test 3

1- Faire correspondre les unités physiques de la première liste aux unités radiométriques de la deuxième liste.

2- Indiquer le nom de la grandeur correspondant à chaque unité.

Grandeur physique	Unités physiques	Unité radiométrique	Grandeur radiométrique
	a- Watt/m ²	1-Candela	
	b- Watt	2-nit	
	c- Watt/Stéradian	3-lux	
	d- Watt/m ² .Stéradian	4-lumen	

Test 4

Décrire une expérience qui permet d'établir une relation entre la brillance énergétique et lumineuse, Exprimer cette relation.

Test 5

Disparition du papillotement en photométrie homochrome et en photométrie hétérochrome.

a- Dispositif expérimental.

b- Conditions expérimentales.

c- Etablir la relation entre les luminances et les brillances énergétiques.

Test 6

Photométrie homochrome. Photométrie hétérochrome. Analogies. Différences.

Test 7

Un sujet observe deux plages juxtaposées de luminances égales à 100 nits ; l'une rouge (670 nm) et l'autre bleue (450 nm).

1- Comparer le rapport $s = \frac{\text{Brillance énergétique du rouge}}{\text{Brillance énergétique du bleu}}$ à l'unité. Justifier la réponse.

2- On divise les brillances énergétiques des deux lumières par 107. Que devient le rapport s ? Pourquoi ?

3- Les luminances des deux plages seront-elles égales ? Pourquoi ?

Test 8

On éclaire un écran E par une lumière monochromatique de longueur d'onde λ variable de 400 à 750 nm, de brillance énergétique B de haut niveau qui ne varie pas au cours de l'expérience.

1- Tracer la courbe qui donne la variation de l'intensité de la sensation s perçue par un observateur normal en fonction de la longueur d'onde : $s = f(\lambda)$.

2- Que peut-on conclure quant aux caractéristiques de la rétine du sujet.

On donne $K = 663 \text{ lumen.Watt}^{-1}$ à 555 nm en vision photopique ($L > 10 \text{ nits}$).

Test 9

On a obtenu la disparition du papillotement en faisant alterner une lumière rouge et une lumière bleue à une cadence de 9 s^{-1} . La luminance est alors 20 nits. Le papillotement réapparaîtra-t-il si :

1- On augmente la cadence des alternances.

2- On multiplie par 10 les flux énergétiques des deux sources. Calculer les luminances correspondantes.

3- On divise par 100 les flux énergétiques des deux sources. Peut-on calculer les luminances correspondantes ?

4- On divise par flux énergétiques des deux sources. Calculer les luminances correspondantes.

On donne : $K = 663 \text{ lumen.Watt}^{-1}$ en vision photopique ($L > 10 \text{ nits}$).
 $K' = 1746 \text{ lumen.Watt}^{-1}$ en vision scotopique ($L < 10^{-3} \text{ nits}$).
 $\frac{V_{\text{scotopique}}}{V_{\text{photopique}}} \cong 10^{-2}$ pour le rouge, et $\frac{V_{\text{scotopique}}}{V_{\text{photopique}}} \cong 10$ pour le bleu

Test 10

Dans un photomètre à papillotement, on fait alterner une lumière de référence de longueur d'onde $\lambda_r = 555 \text{ nm}$ ($L = 100 \text{ nit}$) et une certaine lumière monochromatique de longueur d'onde λ . On a constaté qu'à la disparition du papillotement, le flux énergétique de cette dernière est 10 fois plus grand que celui de la lumière de référence.

1- Evaluer le coefficient d'efficacité lumineuse de la lumière testée.

2- En divisant par 10^5 le flux énergétique de cette lumière, on constate que son efficacité lumineuse devient pratiquement nulle. Quelle est sa couleur ?

Test 11

On a présenté à un sujet normal deux plages étendues, l'une rouge et l'autre verte, qui lui paraissent d'une luminosité (subjective) de même ordre de grandeur à la lumière diurne. Ces mêmes plages, éclairées par une lumière blanche de brillance 10.000 fois plus faible, paraissent de luminance différente.

Laquelle des deux plages paraîtra la plus brillante, pourquoi ?

Test 12

L'efficacité lumineuse d'une certaine lumière monochromatique passe de la valeur 0,1 à 0,01 quand on passe de la vision photopique à la vision scotopique.

De quelle couleur peut-il s'agir ? Justifier la réponse.

Test 13

1- Calculer le diamètre apparent sous lequel un œil normal voit une surface lumineuse, sphérique homogène de 0,20 m de diamètre située à une distance $d = 20 \text{ m}$ de lui. ($1^\circ = 3.10^{-4} \text{ rad}$)

2- Cette surface est-elle vue en vision périphérique si sa luminance est de 10^{-4} nit .

Test 14

Tracer la courbe de la variation du logarithme de la luminance seuil en fonction de la durée de séjour dans l'obscurité pour un sujet normal préalablement soumis à une lumière très intense dans les deux cas suivants :

1- Test de lumière blanche de très faible dimension (inférieur à 1') fixé centralement.

2- Test de lumière dont la longueur d'onde est 750 nm de grande dimension (diamètre apparent $> 15^\circ$) fixé centralement

Test 15 Tracer, pour chacun des tests suivants, la courbe d'adaptation à l'obscurité. Indiquer pour chaque cas le type de vision (centrale ou périphérique) ainsi que la nature des récepteurs intéressés.

- 1- Test rouge de 20 ° en vision centrale.
- 2- Test rouge de 1 ° en vision centrale.
- 3 - Test vert de 20 ° en vision centrale.
- 4- Test blanc de 1 ° en vision centrale.
- 5- Test blanc de 1 ° en vision latérale.
- 6- Test blanc de 20 ° en vision centrale.
- 7- Test blanc de 20 ° en vision centrale pour un sujet profondément carencé en vitamine A.

[illegible]

Test 18

Par une nuit sans lune, un soir d'été humide, un sujet veut observer l'étoile du berger. Doit-il ?

a- la fixer pour la voir.

ou b- l'observer en vision latérale.

Test 19

En radioscopie (technique qui n'est plus utilisée) a-t-on intérêt à éclairer la salle d'examen en lumière rouge ou en lumière bleue. Expliquer pourquoi ?

Test 20

Une personne arrive dans une salle de cinéma alors que la projection a déjà commencé.

1- Peut-il voir tout de suite les fauteuils. Expliquer pourquoi ?

2- En regardant l'écran, il a une sensation de papillotement. Dépend-elle du sujet ou de la projection ?

Test 21

Un sujet fixe centralement une plage lumineuse assez étendue, éclairée en lumière monochromatique dont on augmente progressivement l'éclairement énergétique à partir d'une valeur très faible.

On constate que, pour toute longueur d'onde inférieure à 550 nm, la vision est d'abord achromatique ; puis, à partir d'un éclairement suffisant, elle devient colorée.

Expliquer ce phénomène.

Test 22

1- On présente à un sujet après une adaptation à l'obscurité une plage blanche de luminance de l'ordre de 0,02 nit. Quelle est la luminance apparente de cette plage après :

a- un temps de vision bref.

b- un temps de vision long.

2- En est-il de même si la luminance est de 250 nits ?

Test 23

1- Définir l'acuité visuelle. Un sujet donné a-t-il la même acuité visuelle pour deux optotypes qui comportent des tests de forme différente ?

2- Dans le cas où l'optotype est celui de l'échelle des lettres, tracer, en vous aidant de la figure 18, la courbe de variation de l'acuité visuelle en fonction du logarithme de la luminance L des objets observés lorsque L varie de 10^{-9} à 10^{+5} .

Test 24

Une plage verte de diamètre 10 cm comporte en son centre une lettre (E) imprimée en noir dont les jambages ont une largeur de 1 cm. Elle est placée dans une pièce obscure à 6 m d'un sujet emmétrope. Elle est éclairée de telle sorte que sa luminance $L = 10^{-3}$ nit.

On donne : le diamètre angulaire de la fovéa est de l'ordre de 2° , soit $1/30$ de radian.

1- Le sujet fixe centralement la plage. Peut-il en percevoir l'existence ?

2- En est-il de même en vision latérale ?

3- Dans ces conditions, peut-il lire la lettre ?

4- Qu'en est-il si la plage était rouge ?

Test 25

Calculer l'acuité visuelle d'un sujet qui regarde la lettre E d'un optotype à une distance 5 m. Il arrive à lire la lettre pour laquelle le jambage est de 3 mm ($1' = 3 \cdot 10^{-4}$ radian).

Test 26

Quels sont, parmi les sujets suivants, ceux dont l'acuité visuelle mesurée avec les optotypes habituels (échelle de lettres) est inférieure à $2/10$.

1- Sujet porteur d'une cataracte bilatérale.

2- Hyperope de 3 dioptries âgé de 25 ans non corrigé (luminance du test 1000 nit).

3- Emmétrope âgé de 30 ans lisant le test à la lumière d'un clair de lune d'une nuit d'été.

4- Protanope jeune (luminance du test 1000 nit).

5- Presbyte emmétrope (luminance du test 1000 nit).

Test 27

Parmi les sujets suivants quels sont ceux pour lesquels l'acuité visuelle est très mauvaise (de l'ordre de $1/10$).

1- Emmétrope observant une plage blanche de 105 nits.

2- Emmétrope observant une plage blanche de 104 nits.

3- Emmétrope observant une plage blanche de 10^{-4} nits

4- Protanope en vision photopique.

5- Myope de 5 dioptries en vision photopique.

6- Hyperope de 5 dioptries, âgé de 20 ans, en vision photopique.

7- Hyperope de 5 dioptries, âgé de 20 ans, en vision photopique.

LA VISION DES COULEURS

I- INTRODUCTION : LA TRIVARIANCE VISUELLE.

Comme nous l'avons déjà vu, on distingue dans la perception d'une lumière trois qualités physiologiques. En effet, l'effet sur la rétine d'un stimulus lumineux est caractérisé par trois variables seulement : l'« **intensité** », la **tonalité** ou **teinte** et la **saturation**.

Cette propriété physiologique essentielle de la rétine est connue sous le nom de trivariance visuelle. Nous nous sommes intéressés à la notion d'intensité dans le chapitre précédent ; les deux dernières sont les qualités **chromatiques**, dont l'étude est difficilement séparable, se rapportent à la couleur et jouent donc un rôle distinct de la première qui peut exister seule indépendamment des deux autres.

II- LA COLORIMÉTRIE.

II-1- TONALITÉ D'UNE LUMIÈRE MONOCHROMATIQUE.

Elle ne dépend, en première approximation que de la **longueur d'onde**. Il est bien connu que les dénominations usuelles des grandes catégories de tonalités : violet, bleu, vert, jaune, orangé et rouge s'étendent le long du spectre visible, des courtes longueurs d'onde aux plus grandes, sans limites bien tranchées, en une gradation insensible. Leurs limites sont arbitraires et varient assez largement avec les observateurs (normaux naturellement). Ces dénominations sont d'ailleurs, une question à la fois de vocabulaire et de psychologie : le nombre de noms de couleurs varie avec les différents idiomes.

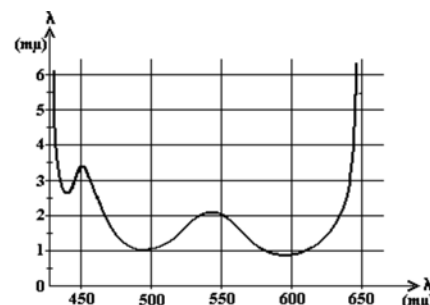
II-1-1- SENSIBILITÉ DIFFÉRENTIELLE AUX COULEURS LE LONG DU SPECTRE.

Pour cette étude, on juxtapose deux plages de même luminance et de longueur d'onde voisine. Une des longueurs d'onde est constante, et on fait varier la deuxième, à partir de cette valeur jusqu'à ce qu'elle paraisse différente de l'autre. Soit **DI**, la différence des deux valeurs ; et on trace la variation de **DI = f(λ)**, on obtient la courbe suivante (Fig 1).

La courbe montre que :

- le rapport **DI / I** n'est pas constant le long du spectre. La loi de **Weber** ne s'applique pas dans ce cas. la sensibilité différentielle de l'œil est **mauvaise aux extrémités du spectre** (**DI** est grand) surtout pour le rouge pour lequel la tonalité est pratiquement la même dans un intervalle assez étendu de longueurs d'onde (région unitonale du spectre au-delà de 680 nm).
- **Au centre du spectre**, la tonalité change très vite, et tous les sujets normaux présentent deux minima du seuil **DI** sensiblement égaux ; l'un vers 490 nm (passage du bleu au vert), et l'autre vers 590 nm (passage du jaune à l'orangé). Un troisième minimum inconstant vers 440 nm.

Fig 1 : Sensibilité différentielle Le long du spectre (d'après Wright et Pitt)



II-1-2- NOTIONS D'ÉCHELONS DE TONALITÉ.

Le sujet normal perçoit environ 200 échelons colorés dans le spectre. Ce nombre est très petit en comparaison avec le nombre total des teintes distinctes perceptibles.

En effet, les tonalités du spectre ne sont pas les seules que l'œil puisse percevoir distinctes. En dehors du blanc, qui n'est pas une tonalité proprement dite, mais l'absence de tonalité, une autre série de tonalités (une centaine d'échelons environ) est constituée par la gamme des **pourpres** (ces couleurs n'appartiennent pas au spectre), résultant d'un mélange de rouge et de bleu spectraux. **Cependant, et ceci est une propriété physiologique très importante de l'œil, il n'y a pas d'autres tonalités perceptibles en plus que celles du spectre et des pourpres.**

Que sont alors les tons rose et bleu pastel par exemple ? Ce ne sont pas des tonalités différentes. Ces teintes ont même tonalité qu'un certain rouge ou un certain bleu du spectre. Elles sont simplement « lavées de blanc ». Ceci nous amène à aborder la dernière qualité physiologique d'une couleur : **la saturation**.

II-2- LA SATURATION

Par définition, **une couleur a une saturation maximale si elle appartient au spectre**. Ce sont des couleurs « **pures** ». On peut aussi parler de saturation dans le cas des **pourpres** obtenus par mélange de rouge et de bleu spectraux. Soulignons encore que **toutes les autres teintes peuvent être obtenues par un mélange convenable d'une couleur pure et de blanc** ;

cela veut dire qu'on pourra toujours trouver un mélange tel que sa teinte paraîtra à l'œil identique à la lumière étudiée. Pour la vérification, on utilise le dispositif à deux plages juxtaposées. L'une sera éclairée par la lumière étudiée, l'autre par le mélange d'une lumière spectrale de longueur d'onde λ , appelée **longueur d'onde dominante**, et de luminance L_l et de blanc de luminance L_w . L'identité de l'aspect des plages se traduit par l'**équation colorimétrique** :

$$L = L_l + L_w \quad (1)$$

Dans cette équation colorimétrique, le signe (=) traduit une **égalisation sensorielle** donc **purement subjective** qui varie, dans certaines limites, avec l'observateur d'où, la nécessité de définir un observateur de référence.

II-2-1- LONGUEUR D'ONDE DOMINANTE.

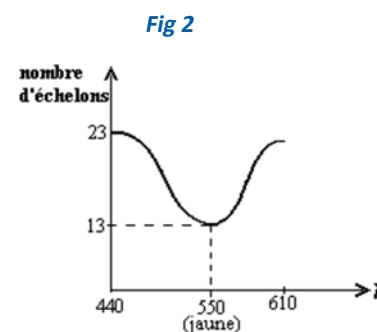
La **longueur d'onde dominante**, définit de façon précise, la notion de tonalité.

Le **facteur de pureté p** est le rapport dans le mélange équivalent, de la luminance de la lumière de longueur d'onde dominante à la luminance totale.

$$p = \frac{L_\lambda}{L_\lambda + L_w} = \frac{L_\lambda}{L} \quad (2)$$

Pour une tonalité donnée, on peut mesurer le nombre d'échelons de saturation que l'œil peut distinguer depuis la couleur spectrale jusqu'au blanc (Fig 2) (Courbes de **Jones**).

Cette courbe représente le nombre d'échelons de saturation le long du spectre. Ce nombre n'est pas le même pour toutes les couleurs, il est minimal pour le jaune, et il augmente quand se déplace vers les extrémités du spectre. Ce qui permet de dénombrer un ensemble de teintes perceptibles, pour le sujet normal, de l'ordre de 17.000 (**Mac Adam**).



II-2-2- LES TEINTES RABATTUES.

Ce sont les **marrons**, les **bruns**, les **verts olive**, qui paraissent fort distincts des tonalités du spectre et des pourpres qui, seuls existaient, d'après ce que nous venons de voir.

Ces teintes que les peintres nomment « rabattues » n'ont pas à entrer en ligne de compte dans l'expérimentation sur la vision des couleurs. Leur perception résulte en effet, de la conjonction des deux effets psychologiques fondus ensembles, la **perception colorée** proprement dite et, la propriété qu'a l'œil d'**apprécier le pouvoir de réflexion diffuse des objets**.

Si un corps paraît coloré, c'est que la réflexion diffuse est sélective. L'objet qui nous paraît rouge absorbe toutes les longueurs d'onde sauf celle du rouge qu'il diffuse (il la renvoie dans toutes les directions). De plus, pour les longueurs d'onde qu'il est capable de diffuser, le pouvoir de réflexion diffuse peut être plus ou moins grand. Si le corps renvoie, par exemple, la quasi-totalité des radiations rouges que la lumière incidente lui apporte, il nous paraîtra d'un rouge éclatant. Mais, s'il n'en renvoie qu'une faible partie, l'œil verra alors une teinte en apparence nouvelle : rouge brun ou marron.

II-2-3- LA TRIVARIANCE VISUELLE.

L'équation colorimétrique (1) : $L = L_l + L_w$ met en évidence la trivariance visuelle. Un stimulus lumineux peut être entièrement caractérisé pour l'œil par trois variables seulement que l'on peut faire correspondre aux trois qualités physiologiques précédentes.

- à l'intensité physiologique correspond une variable lumineuse : la luminance **L**.
- à la tonalité correspondent deux variables chromatiques :
 - la longueur d'onde λ .
 - le facteur de pureté $p = \frac{L_\lambda}{L}$ qui caractérise la saturation.

II-3- LOIS DITES DU MÉLANGE DES COULEURS.

Les lois du mélange des couleurs sont en étroite connexion avec la loi de la trivariance visuelle. On envisagera seulement le **mélange des lumières colorées** et non le mélange de **pigments** comme sur la palette du peintre. Ces derniers ne sont colorés qu'en raison de leur absorption sélective et, dans ces mélanges, ce sont les absorptions qui s'ajoutent et non les lumières diffusées, si bien que les résultats des mélanges de pigments donnent des teintes rabattues (mélanges soustractifs).

II-3-1- TECHNIQUE.

Elle utilise des appareils très variés appelés colorimètres qui permettent de superposer en une même plage de la rétine du sujet les faisceaux lumineux que l'on veut « mélanger ». Il est nécessaire de connaître de façon précise pour chacun de ces faisceaux les grandeurs, qu'il est nécessaire de faire varier indépendamment :

- La **composition spectrale**. On utilisera souvent des lumières monochromatiques, ou une lumière blanche filtrée par des filtres colorés étalonnés.
- Le **flux lumineux** ou, ce qui revient au même, la luminance des sources qui émettent ces faisceaux.

II-3-2- ÉQUATION COLORIMÉTRIQUE FONDAMENTALE.

Couleurs complémentaires.

Dans l'équation colorimétrique (1), $L = L_1 + L_w$, la composition spectrale de la lumière étudiée peut être absolument quelconque. Par ailleurs, la loi d'**Abney** stipule qu'on peut aussi obtenir la lumière étudiée (de luminance L) en composant deux lumières monochromatiques de longueurs d'onde λ_1 et λ_2 et de luminances respectives L_1 et L_2 ; puisque les luminances sont additives (relation 3).

$$L = L_1 + L_2 \quad (3)$$

d'après (1); $L_1 + L_2 = L_\lambda + L_w \quad (4)$

Cette équation (4) est l'équation colorimétrique fondamentale du « mélange des couleurs ». L'expérience montre que, pour que cette équivalence existe, il est nécessaire que λ_1 et λ_2 ne soient pas trop écartées. On a alors : $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$.

La longueur d'onde dominante qui caractérise la tonalité de la lumière résultante est comprise entre les longueurs d'onde des composantes, lorsque celles-ci ne sont pas très écartées l'une de l'autre.

Ainsi, le mélange en proportions variées d'un rouge (650 nm), et d'un vert (540 nm) donnera toutes les teintes de verts jaune, de jaunes et de jaunes orangés. Ceci est la conséquence de la trivariance visuelle. Les trois variables physiques L_1 , L_2 , λ_1 et λ_2 se réduisent pour l'œil à trois seulement qui sont : λ , L_λ et L_w .

Mais, pour un écart plus grand de longueurs d'onde des composantes, il peut arriver pour une proportion convenable des luminances que la tonalité résultante disparaisse, autrement dit, le mélange obtenu donne un **blanc** d'une certaine luminosité. Ces couples de couleurs sont dits **complémentaires**; en voici quelques exemples.

Couleur	Longueur d'onde λ (nm)	Complémentaire	Longueur d'onde de la complémentaire (nm)
Violet	433	Vert-jaune	564
Bleu	485	Jaune	585
Bleu-vert	492	Rouge	656

Lorsque les longueurs d'onde des composantes sont voisines des extrémités du spectre, la couleur résultante est un **pourpre**. Il en résulte que le vert pur (exemple : la raie verte du mercure 546 nm) n'a pas son complémentaire dans le spectre; celle-ci est un pourpre. Un pourpre n'étant pas une couleur spectrale et n'ayant pas de longueur d'onde dominante propre, sera **caractérisé par la longueur d'onde de son complémentaire**.

II-3-3- GÉNÉRALISATION : LOIS DE GRASSMANN.

On généralise aisément l'équation colorimétrique fondamentale, à condition d'admettre un autre fait expérimental, que les grandeurs qui figurent dans une équation colorimétrique jouissent des mêmes propriétés que les grandeurs arithmétiques dans une équation ordinaire, ce qui nous permet de retrouver les équations de **Grassmann** (1853).

Si on considère l'équation (4) : $L_1 + L_2 = L_\lambda + L_w \quad (5)$

L'expérience montre que **dans les limites de la vision photopique**, l'égalité des sensations est conservée, si on multiplie par un facteur k quelconque les deux membres de l'équation, on obtient :

$$k L_1 + k L_2 = k L_\lambda + k L_w$$

L'expérience montre aussi que l'égalité se vérifie, si on ajoute aux deux membres de l'équation une luminance L_3 de longueur d'onde λ_3 . On obtient alors :

$$L_1 + L_2 + L_3 = L_\lambda + L_w + L_3 \quad (6)$$

Or d'après la relation (5), on peut écrire :

$$L_\lambda + L_3 = L_\lambda' + L_w' \quad (7)$$

λ' est une longueur d'onde comprise entre λ et λ_3 .

$$\lambda < \lambda' < \lambda_3.$$

L_w' définit une nouvelle luminance du blanc : L_w''

En définitive on a :

$L_1 + L_2 + L_3 = L_\lambda + L'_w$. Cette loi exprime que l'on peut obtenir une lumière de luminance donnée par le mélange d'une lumière spectrale et du blanc ou par celui de trois lumières de longueurs d'onde données et de luminances convenablement choisies. Cette loi s'écrit généralement :

$$L_1 + L_2 + L_3 = L_\lambda + L_w \quad (8)$$

On retrouve là les lois, **vérifiées expérimentalement**, d'**additivité**, d'**associativité** et de **proportionnalité** qui sont propres aux équations linéaires.

Ces lois se vérifient, d'autre part, à un nombre supérieur à deux composantes, donc à toute lumière de composition spectrale quelconque.

Donc, pour reproduire la tonalité de n'importe quelle couleur, il faut mélanger en proportions convenables, au moins **trois lumières différentes** qu'on appelle **primaires**.

Pour **le choix de ces primaires**, il suffit que **la longueur d'onde de l'une ne puisse pas être reproduite par un mélange des deux autres**. On choisit habituellement, pour des raisons que nous allons voir, un **bleu** (B), un **vert** (G : Green) et un **rouge** (R). On peut, par un mélange convenable de ces trois lumières reproduire la tonalité d'une couleur donnée quelconque.

Mais en général, il est **impossible de reproduire par un mélange de primaires, une teinte aussi saturée que celle du spectre**. Par exemple, si un mélange de rouge et de vert spectraux donne des jaunes et des orangés, pratiquement aussi saturés que les couleurs correspondantes du spectre, un mélange de bleu et de vert spectraux donnera un bleu vert nettement lavé de blanc.

Remarque : La photo en couleur, faisant appel à des mélanges de pigments rouge vert et bleus, il lui est toujours impossible d'obtenir dans toute sa pureté une photographie du spectre ; mais il est toujours possible de reproduire du blanc avec un mélange convenable des trois primaires.

II-3-4- SYSTÈMES COLORIMÉTRIQUES.

Reprenons l'équation (8) et adoptons la **convention** suivante : celle de considérer les termes de l'équation colorimétrique comme des valeurs algébriques, c'est-à-dire d'avoir la possibilité d'envisager des luminances négatives. Bien entendu, de telles luminances n'ont, en elles-mêmes, aucun sens physique, mais ajouter à un de deux membres une luminance négative revient à ajouter la même valeur positive à l'autre membre de l'équation colorimétrique, et cette dernière opération a un sens physique.

Remplaçons dans l'équation (8) la luminance L_w par une somme des trois luminances des primaires qui la constituent, soit : $L_w = L_B + L_G + L_R$; on peut écrire alors :

$$L_B + L_G + L_R = L_\lambda + L_B + L_G + L_R \quad (9)$$

Ce qui donne, en utilisant la convention adoptée :

$$(L_B - L_B) + (L_G - L_G) + (L_R - L_R) = L_\lambda$$

$(L_B - L_B)$, $(L_G - L_G)$ et $(L_R - L_R)$ sont de nouvelles luminances des mêmes primaires qu'on peut écrire :

$$(L_B - L_B) = L'_B ; (L_G - L_G) = L'_G \text{ et } (L_R - L_R) = L'_R$$

$$\text{d'où : } L'_B + L'_G + L'_R = L_\lambda \quad (10)$$

Cette équation (10) signifie qu'une lumière monochromatique spectrale peut être reconstituée à partir des trois primaires, elle paraît contredire la relation (3). Mais ceci n'est vrai que si l'une des trois luminances L'_B , L'_G ou L'_R est négative.

Moyennant cette convention, on peut dire que toute lumière de luminance L peut être reproduite par la somme algébrique adéquate de luminances des trois primaires. Ce mode de représentation s'appelle le système trichromatique de représentation d'une couleur, elle fait intervenir trois longueurs d'onde : L_B , L_G et L_R .

Il faut encore répéter cependant qu'une luminance négative ajoutée à une plage d'un colorimètre signifie qu'elle est ajoutée à l'autre plage en valeur positive.

Soit L_B , L_G et L_R les luminances unitaires des trois primaires.

- Toute luminance L_i de l'une de ces primaires différente de la valeur unitaire pourra être écrite sous la forme $G_i L_i$
- et toute luminance L pourra s'écrire :

$$L = G_B L_B + G_G L_G + G_R L_R$$

Donc, toute lumière de luminance L est entièrement caractérisée par les coefficients G_B , G_G et G_R une fois qu'auront été choisies les primaires et leurs luminances correspondantes : L_B , L_G et L_R jouant le rôle d'unités. C'est un nouveau mode d'expression de la trivariance visuelle.

Faire un tel choix consiste à définir un système colorimétrique. Comme le choix des primaires et celui de leurs unités sont en grande partie arbitraires, il est évident qu'il est toujours loisible de changer de système colorimétrique. Et, comme les équations de **Grassmann** sont linéaires (du premier degré), dans le nouveau système, chacun des coefficients G sera lié aux anciens par des équations, elles aussi, linéaires.

II-3-5- REPRÉSENTATION TRIANGULAIRE. LIEU DU SPECTRE.

II-3-5-1- L'espace chromatique.

Puisque toute couleur peut être décrite par un ensemble de trois variables, il est naturel de la représenter par un point dans un espace à trois dimensions, qu'on appelle l'espace chromatique.

Considérons donc trois axes qui ne sont pas nécessairement orthogonaux les uns aux autres, mais, les trois angles formés par les axes deux à deux, sont égaux.

Pour représenter une luminance L dans cet espace, on porte sur chacun des trois axes des segments proportionnels aux luminances des trois primaires choisies, soient L_1 , L_2 et L_3 (Fig 3)

La première loi de **Grassmann** qui veut que l'égalité :

$$L = L_1 + L_2 + L_3$$

Entraîne : $kL = kL_1 + kL_2 + kL_3$

Signifie que : toute augmentation de luminance entraîne un déplacement du point représentatif de la lumière sur la droite OL. Il s'agit d'une homothétie de centre O et de rapport k (Fig 4)

Fig 4 : Première loi de Grassmann
Dans l'espace chromatique

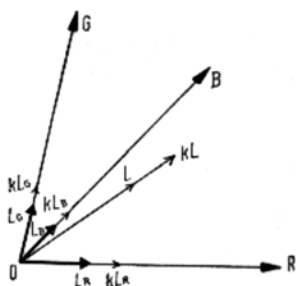
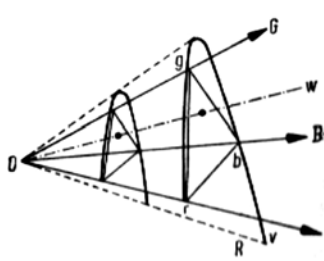


Fig 5 : Espace chromatique
Plans d'égale luminance
et triangles des couleurs



Donc : tous les points situés sur une même droite passant par l'origine O, ne diffèrent que par la luminance ; ils possèdent les mêmes qualités chromatiques : tonalité et saturation. En particulier, une de ces droites est la droite des blancs OW. Pour les trois primaires choisies, ces droites sont les axes de coordonnées. Pour les autres couleurs spectrales, les droites en question sont situées en dehors du trièdre, puisque l'une des coordonnées est négative.

Les couleurs spectrales forment donc une nappe conique qui s'appuie sur les trois axes de coordonnées (Fig 5) où l'on voit une section du cône par un plan tel que :

$$O_r = O_g = O_b$$

L'axe O_v correspond à une teinte violette. Le plan formé par les droites O_v et O_r correspond à un mélange de bleu et de rouge : c'est le plan des pourpres.

La deuxième loi de Grassmann relative à l'addition de deux lumières montre que celle-ci revient à additionner graphiquement deux vecteurs : les composantes de la somme de deux lumières sont égales à la somme des composantes. Comme la somme de deux vecteurs se trouve à l'intérieur de l'angle qu'ils forment, il résulte que la lumière obtenue par addition de deux ou plusieurs lumières spectrales se trouve à l'intérieur du cône spectral complété par le plan des pourpres. De même le mélange de trois primaires ne peut se trouver qu'à l'intérieur du trièdre de référence. La portion de l'espace comprise entre le cône spectral et le trièdre correspond à des couleurs dont l'une des composantes est négative, c'est-à-dire une couleur plus saturée que celles qu'on peut obtenir par synthèse strictement additive des composantes.

Les représentations spatiales des couleurs ne sont pas de manipulation très commode. C'est pourquoi on préfère une représentation plane (à deux dimensions) dite triangle des couleurs.

II-3-5-2- Le triangle de Maxwell.

Le système colorimétrique, une fois choisi, il est possible de synthétiser les lois de **Grassmann** par une représentation géométrique très commode due à **Maxwell**.

On considère un triangle, a priori quelconque, mais habituellement équilatéral ou rectangle, et on place aux trois sommets des masses fictives respectivement égales aux coefficients G_B , G_G et G_R précédemment envisagés. La linéarité des lois de Grassmann a pour conséquence que la lumière résultante de luminance L pourra être placée au centre de gravité de ces trois masses.

Si on multiplie les coefficients G_B , G_G et G_R par un même nombre, la loi de proportionnalité montre que la lumière résultante ne change pas de teinte, sa luminance devient seulement plus élevée. Or le centre de gravité de masses proportionnelles aux anciennes ne change pas de position. Le point où est situé le centre de gravité caractérise donc la chromaticité (les deux variables chromatiques) de la lumière résultante indépendamment de sa luminance L . On peut alors choisir des coefficients g_B , g_G et g_R proportionnels respectivement à G_B , G_G et G_R , tels que leur somme soit égale à 1.

$$g_B + g_G + g_R = 1 \quad ; \quad \text{avec} \quad : \quad g_i = \frac{\Gamma_i}{\Gamma_B + \Gamma_G + \Gamma_R}$$

Les g_i sont appelés coordonnées trichromatiques de la lumière en question. On remarquera que, seulement deux sont indépendants, le troisième peu être déduit de la relation $g_1 + g_2 + g_3 = 1$.

Maxwell a choisi un triangle équilatéral pour pouvoir utiliser la propriété qu'a ce dernier qui dit que : **la somme des perpendiculaires abaissées d'un point quelconque sur chacun des trois côtés est égale à la hauteur**. Si la hauteur du triangle est choisie égale à 1, chaque segment perpendiculaire représente une coordonnée trichromatique.

Tout point intérieur au triangle aura donc des coordonnées trichromatiques positives, et la lumière qu'il représente pourra être réellement obtenue par superposition d'une proportion convenable des trois primaires. Mais tout point extérieur au triangle aura au moins une de ses coordonnées trichromatiques négative ; et c'est en superposant la lumière qu'il représente à une quantité convenable de la primaire dont la coordonnée trichromatique est négative que l'on réalisera l'égalité d'aspect avec une superposition (en proportions convenables) des deux autres primaires.

Dans le cas de la figure 6, les primaires R (Red), G (Green) et B (Blue) sont monochromatiques de longueur d'ondes respectives : 650, 528 et 450 nm. Les unités lumineuses ont été choisies de façon que le blanc (W), correspondant à la lumière solaire, soit au centre géométrique du triangle équilatéral.

Sur le lieu du spectre (remarquer qu'il est extérieur au triangle) ont été marquées quelques valeurs de λ en nm (10^{-9} m).

Entre 530 et 650 nm, le lieu du spectre, en toute rigueur, extérieur au triangle, se confond pratiquement avec le côté RG.

Cette figure montre également qu'il n'est pas possible de synthétiser réellement par la superposition des trois primaires, une lumière monochromatique (spectrale). Il faut que l'une, au moins, de ses trois coordonnées trichromatiques soit négative.

La forme du lieu du spectre varie naturellement avec le système colorimétrique et le triangle choisis ; cependant, quelques caractères sont constants tels que :

La portion du lieu du spectre qui va du rouge extrême au vert jaune est pratiquement rectiligne.

Si l'on a choisi parmi les primaires deux lumières monochromatiques, une rouge et une vert jaune, la portion du lieu du spectre comprise entre elles se confond avec un côté du triangle des couleurs.

- Pour obtenir la longueur d'onde dominante d'une lumière quelconque (point P du triangle), on trace la droite WP orientée de W vers P. Le point d'intersection de cette droite avec le spectre est la couleur dominante.
- La lumière complémentaire de P (deux couleurs complémentaires sont telles que l'addition de leurs luminances donne le blanc) est représentée par un point P' tel que P et P' soient symétriques par rapport à W.
- La dominante de la complémentaire est obtenue par l'intersection de la droite orientée WP' avec le spectre.
- À chaque couleur dominante, il correspond une longueur d'onde ; et si la longueur d'onde dominante est un pourpre, elle sera caractérisée par la longueur d'onde de son complémentaire.
- La représentation triangulaire donne une idée immédiate de la saturation d'une lumière donnée. Plus son point représentatif est rapproché du lieu du spectre, plus elle est saturée et plus son facteur de pureté est proche de 1.

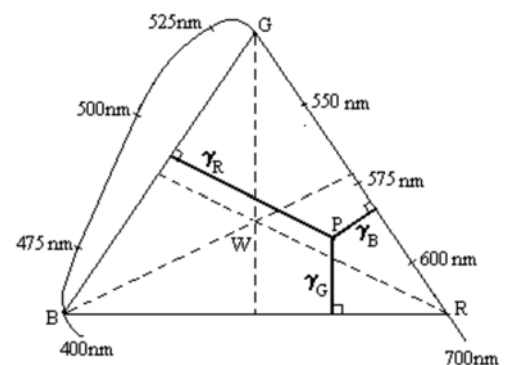
Exemple : Dans un système colorimétrique, on a choisi pour primaires, des lumières monochromatiques de longueurs d'onde respectives : $\lambda_B = 400$, $\lambda_G = 540$ et $\lambda_R = 700$ nm. Les unités lumineuses des primaires ont été choisies de telle sorte que le blanc soit au centre géométrique d'un triangle équilatéral de type **Maxwell**.

1- Placer dans le triangle le point P représentatif d'une lumière de coefficients trichromatiques

a- $g_B = 0,2$; $g_G = 0,3$ et $g_R = 0,5$.

b- $g_B = 0,5$; $g_G = 0,1$

Fig 6 : Triangle de Maxwell



- 2- Placer dans le triangle le point P' représentatif de la lumière complémentaire de P dans les cas a- et b-
- 3- Quelles sont les tonalités des dominantes de P et de P' dans les cas a- et b- ? Peut-on associer à chacune une valeur de la longueur d'onde ?

Réponses :

1 et 2-a-

Pour placer P de coefficients trichromatiques : $g_B = 0,2$; $g_G = 0,3$ et $g_R = 0,5$, on procède de la manière suivante (Fig 9) :

- On construit la parallèle au côté GR à une distance égale à $2/10$ de la hauteur issue de B ; le point P doit se trouver sur cette droite
- P se trouve également sur une parallèle au côté BR à une distance égale à $3/10$ de la hauteur issue de G . Il est donc à l'intersection de ces deux droites.
- On peut vérifier que P est sur une parallèle au côté BG à une distance égale à $5/10$ de la hauteur issue de R .

et 2- b-

Pour placer les points P et P' de coefficients trichromatiques $g_B = 0,5$; $g_G = 0,1$, on procède de la même manière que dans le cas a- voir (Fig 10).

3-a

- * Pour obtenir la longueur d'onde dominante de la lumière représentée par P , on trace la droite WP orientée de W vers P . Le point d'intersection de cette droite avec le spectre est la couleur dominante : Il s'agit d'un **orangé**. L'orangé est une lumière spectrale, on peut lui associer une longueur d'onde.

P est situé entre l'orangé et le blanc, c'est un **orangé lavé de blanc**.

- * La lumière complémentaire de P (deux couleurs complémentaires sont telles que l'addition de leurs luminances donne le blanc) est représentée par un point P' tel que P et P' soient symétriques par rapport à W . La dominante de P' est un **bleu vert**. Le bleu vert est une lumière spectrale, on peut lui associer une longueur d'onde.

P' correspond à un **bleu vert lavé de blanc**.

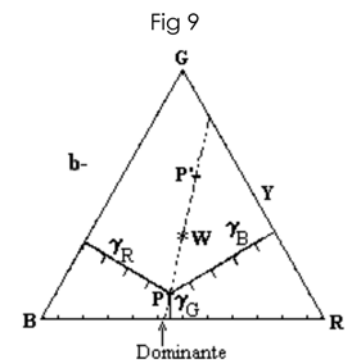
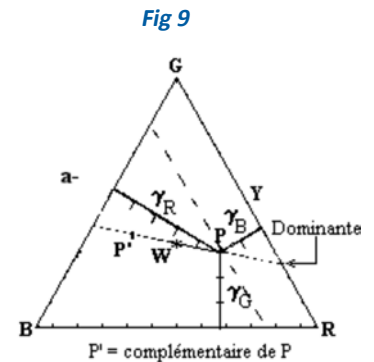
3-b-

- * La longueur d'onde dominante de la lumière représentée par P est un **pourpre**. Le pourpre n'est pas une couleur spectrale (c'est un mélange de bleu et de blanc), il ne peut pas être caractérisé par une longueur d'onde.

P est situé entre le pourpre et le blanc, il correspond à un **pourpre lavé de blanc**.

- * La lumière complémentaire de P par le point P' symétrique P par rapport à W . La dominante de P' est un vert jaune. Le **vert jaune** est une lumière spectrale, on peut lui associer une longueur d'onde.

P' correspond à un **vert jaune lavé de blanc**.



III- PHÉNOMÈNES SUBJECTIFS DIVERS DE LA VISION NORMALE DES COULEURS.

III-1- EXISTENCE DE 3 PIGMENTS ET DE 3 TYPES DE CÔNES

Les faits exposés précédemment, et particulièrement la synthèse trichrome des sensations colorées, suggèrent fortement l'existence de **trois pigments** sensible sélectivement l'un au rouge, l'autre au vert et le troisième au bleu. Cette hypothèse a été avancée par le physicien anglais **Thomas Young** puis développée dans la seconde moitié du XIX^e siècle par l'allemand **von Helmholtz**.

Par la suite, de travaux ont été faits pour mettre en évidence ces trois pigments, et ce n'est que de façon très récente qu'ils ont été couronnés de succès.

À l'état normal, il existe au niveau de la rétine trois types de cônes portant chacun un pigment dont les maximums de sensibilité sont situés à **440, 535 et 575 nm** ces pigments sont sensibles : l'un au bleu, l'autre au vert et le troisième au rouge dont la courbe d'absorption est donnée par la figure 12 (d'après les travaux de **Marks et W Dohell**)

Il est intéressant de constater que le pigment « sensible au rouge » a son maximum dans le jaune. Mais il apparaît cependant que le spectre de ce pigment s'étend assez loin dans le rouge, où il est beaucoup plus sensible que les autres pigments. Quant à la nature chimique de ces pigments, il s'agirait de rétinol associé à trois opsines différentes entre elles, et distinctes de la rhodopsine.

Mais cette opinion n'est pas admise par tous à cause de la difficulté extrême à extraire les pigments des cônes, alors que c'est très facile pour la rhodopsine.

Sous l'influence de la lumière, ces pigments subissent une décomposition réversible comparable à celle de la rhodopsine. Ceci permettrait de comprendre l'adaptation des cônes à l'obscurité.

Ces notions nous permettent de comprendre certains faits expérimentaux que nous allons exposer

III-2- L'ADAPTATION COLORÉE.

Si la rétine est stimulée, alors qu'elle a été soumise au préalable à une autre lumière dite **lumière d'adaptation**, des **modifications de tonalité et de saturation** surviennent dans l'aspect du stimulus

III-2-1- FAITS REMARQUABLES À SOULIGNER.

Deux faits remarquables sont à souligner :

- **L'indépendance de chacun des yeux** vis-à-vis de l'adaptation colorée a pour conséquences :
 - **pratique** : la possibilité de mesure, par des égalisations binoculaires comparant une plage vue par l'œil adapté et une plage par l'œil non adapté, de façon précise les faits d'adaptation.
 - **Théorique** : elle prouve que l'adaptation relève de phénomènes rétinien et non pas centraux.
- **Les phénomènes d'adaptation** conservent, en général, les lois de Grassmann, **sauf si la lumière d'adaptation est particulièrement intense**.

III-2-2- ADAPTATION GÉNÉRALE.

C'est le fait connu sous le nom de « constance des couleurs ». Par exemple, la lumière diurne contient plus de radiations bleues que la lumière artificielle des lampes à incandescence.

Un objet blanc, c'est à dire diffusant également toutes les radiations visibles, **devrait paraître jaunâtre quand on passe de la lumière du jour à l'éclairage par la lampe à incandescence**. C'est en effet ce qui se produit au début, mais, rapidement, **l'adaptation générale fait qu'il paraît blanc à nouveau**.

Si un objet est coloré, chaque fois que la lumière d'illumination ne diffère pas beaucoup, par sa composition spectrale, de la lumière blanche, l'adaptation générale entraîne rapidement leur identité d'aspect quel que soit l'illuminant.

III-2-3- ADAPTATION LOCALE COLORÉE.

C'est celle qui s'adapte le mieux aux mesures précises

- On peut aisément réaliser les expériences suivantes :
 - On présente à un sujet **une plage**
 - Dont les dimensions sont telles que l'image couvre, à la fois, la rétine centrale et périphérique.
 - **d'une couleur primaire donnée** (rouge par exemple),
 - et de luminance importante, mais non éblouissante,
 - pour qu'il la fixe pendant un temps assez long (une minute par exemple), afin de l'adapter à cette lumière et de fatiguer ses récepteurs responsables de la vision de cette couleur. **Ce sujet regarde avec un seul œil et garde le deuxième fermé.**
- **1-** On remplace cette plage rouge par une autre de couleur blanche, Le sujet la regarde alternativement :
 - avec l'œil adapté (le deuxième fermé)
 - puis avec l'œil non adapté (le deuxième fermé),

il la perçoit :

- bleu verdâtre avec l'œil adapté
 - blanche avec l'œil non adapté
- **2-** On présente au sujet, après adaptation au rouge, d'une autre de même luminance et de couleur complémentaire (bleu-vert)

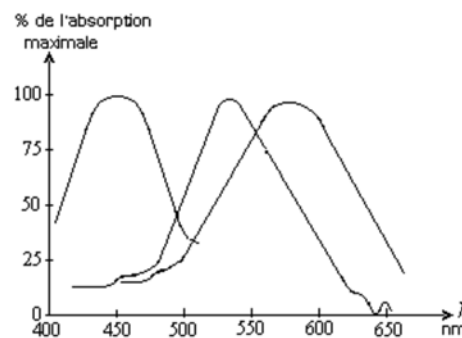
Cette plage paraît au sujet plus saturée pour l'œil adapté que pour l'œil non adapté

Explication :

La fatigue des récepteurs du rouge conduit à leur décomposition momentanée. Le sujet devient un **dichromate artificiel**. Il va alors reconstituer toutes les autres couleurs avec les deux autres primaires bleue et verte qui lui restent.

1- La plage est vue bleu-verdâtre avec l'œil adapté, car, pour voir le blanc, il faut trois récepteurs.

Fig 12



2- Le bleu vert lavé de blanc, complémentaire du rouge, sera saturé pour l'œil adapté, car, étant donné qu'il ne possède que deux types de récepteurs, le point représentatif de cette lumière sera sur le côté du triangle (il correspond à la projection du point représentatif de la vraie lumière sur le côté joignant les deux primaires restantes). L'absence du troisième récepteur n lui permet pas de voir les lumières dont les points représentatifs sont à l'intérieur du triangle.

- S'il regarde avec l'œil non adapté, qui possède ses trois types de récepteurs, il verra la plage avec sa couleur normale, c'est-à-dire :
 - Blanche dans le premier cas
 - Bleu-verte lavée de blanc dans le deuxième cas.

De la même façon, on peut créer des dyschromatopsies artificielles. Ainsi :

- après exposition prolongée à une lumière intense verte, un sujet devient un deutéranope artificiel par décomposition du pigment « vert », et
- après exposition prolongée à une lumière intense violette, un sujet devient un tritanope artificiel par décomposition du pigment « bleu ».
- Après exposition prolongée à une lumière intense bleu-vert, un sujet devient monochrome artificiel au rouge par décomposition des pigments « bleu et vert ». Si la lumière d'adaptation est jaune, le sujet devient monochrome artificiel au bleu.

L'ensemble des résultats expérimentaux est regroupé sous le nom d'« **adaptation locale colorée** »

III-3- PHÉNOMÈNE DE BEZOLD-BRUCKE.

Lorsque la luminance d'une source est accrue de façon considérable, la tonalité tend à varier. Les couleurs du spectre situées entre le rouge et le vert jaunâtre tendent vers le jaune et celles entre violet et le bleu vert tendent vers le bleu. Toutes les tonalités de luminance élevée ne peuvent tendre que vers deux teintes :

- le jaune de longueur d'onde 570 nm et
- le bleu de longueur d'onde 475 nm.

III-4- IMAGES CONSÉCUTIVES.

Ce fait caractérise la sensation de perception, dans l'obscurité complète, d'images lumineuses consécutives à l'exposition à une excitation lumineuse assez intense. En effet, après une excitation lumineuse assez intense, **on perçoit encore dans l'obscurité complète**, des sensations lumineuses qui se succèdent en une série de phases, séparées par des intervalles obscurs, dont la durée peut varier d'une fraction de seconde à plusieurs minutes. Ces images sont soit positives (homochromes), soit négatives (complémentaires). **Après fixation d'une plage blanche très brillante, on observe dans l'image consécutive, une suite de couleurs** : vert, jaune, rouge, pourpre, bleu, etc.

Les images négatives peuvent être expliquées, au moins en partie, par le phénomène d'adaptation locale.

III-5- SIMPLICITÉ PSYCHOLOGIQUE DE CERTAINES COULEURS.

Il existe dans le spectre, des radiations qui paraissent psychologiquement simples, par opposition à d'autres dans lesquelles les sujets croient voir un mélange.

Ces couleurs psychologiquement simples sont un rouge, un jaune (en moyenne 577 nm), **un vert et un bleu** (472 nm).

On croit que l'orangé est un mélange de rouge et de jaune, que le bleu vert est un mélange de bleu et de vert, et que le violet est un mélange de rouge et de bleu.

Seuls les pourpres sont des mélanges dans lesquels, avec un peu d'entraînement, on arrive indiquer, sans égalisation colorimétrique, avec une relative exactitude, les proportions des couleurs composantes.

III-6- INTERVALLE PHOTOCHROMATIQUE.

Quand on fait croître progressivement l'intensité d'une lumière colorée à partir du seuil de perception, on ne perçoit au début qu'une sensation incolore. Ce n'est que lorsque la luminance atteint une certaine valeur que la sensation colorée apparaît. On appelle **intervalle photochromatique le rapport de l'intensité au seuil chromatique à l'intensité au seuil incolore**. Cet intervalle est fonction à la fois de la couleur considérée, de l'état d'adaptation de l'œil et de la région intéressée de la rétine.

L'intervalle photochromatique du rouge est pratiquement nul.

L'intervalle photochromatique est minimal au voisinage de la fovéa et augmente à mesure qu'on s'en éloigne. On peut trouver là une nouvelle preuve de la dualité rétinienne : « cônes-bâtonnets »

III-7- VISION DES COULEURS ET CHAMP VISUEL.

Le champ visuel est l'espace que l'on peut percevoir en gardant l'œil immobile. Ce champ n'est pas le même pour toutes les couleurs. C'est pour le blanc que les limites sont les plus reculées. Viennent ensuite en décroissant **le bleu, le rouge et le vert**.

- **Le centre de la fovéa** paraît **bivariant** avec pratiquement disparition de la sensation du bleu. On y trouve l'analogue de la dyschromatopsie rare appelée **tritanopie**.
- **Si l'on s'écarte beaucoup de la fovéa** :
 - **au-delà de 30 °** apparaît aussi une bivariance où le rouge et le vert sont fondus en une sensation jaune, et les bleus vert, bleus et pourpres fondus en une sensation bleue ; on a l'analogue de la dyschromatopsie (fréquente) appelée **deutéranopie**.
 - **Au-delà de 50 °**, la vision des couleurs disparaît par la disparition des cônes.

IV- PATHOLOGIE DE LA VISION DES COULEURS.

Les **dyschromatopsies** sont, dans leur ensemble, une anomalie assez fréquente, car, 8 à 9% de la population en est affectée. La fréquence est très inégalement répartie selon le sexe, le masculin prédominant largement (transmission héréditaire suivant les lois de la récessivité liée au chromosome X)

Elles peuvent être classées en trois grandes catégories, de fréquence très inégale (la classification a été faite par **Von Kries**). On distingue :

- **Les dichromates, ils sont tous anormaux**, parmi lesquels on distingue :
 - Les protanopes, insensibles au rouge : 15% des dyschromatopes.
 - Les deutéranopes, insensibles au vert : 15% des dyschromatopes.
 - Les tritanopes : 0% des dyschromatopes.
- **Les monochromates**, qui ne perçoivent aucune couleur, leur nombre est $\ll 1/1000$ des dyschromatopes.

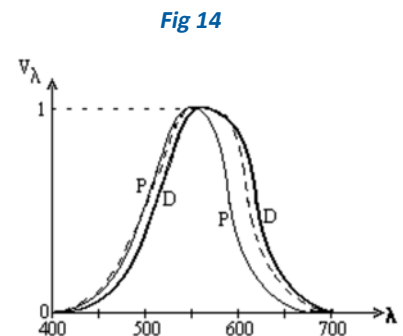
IV-1- LES TRICHROMATES ANORMAUX.

Ce sont des sujets qui possèdent les trois types des cônes, mais, un des trois est dans

- Les protanomaux, peu sensibles au rouge : 11% des dyschromatopes.
- Les deutéranomaux, peu sensibles au vert : 56% des dyschromatopes.
- Les tritanomaux : peu sensibles au bleu, pratiquement inexistant : 0%.

Ces malformations sont héréditaires, récessives, liées au sexe. Transmises par les femmes, ce sont les hommes qui en sont atteints. On peut rencontrer des femmes atteintes, elles sont homozygotes, ce qui est rare.

La vision de ces sujets, comme pour les normaux, est trivariante, mais, une égalisation des teintes faite par le sujet normal leur paraît fausse et réciproquement. Cette différence sur les égalisations est beaucoup plus accentuée pour les deutéranomaux que pour les protanomaux.



La figure 14 montre que les courbes d'efficacité lumineuses sont différentes pour les deux variétés. La courbe du sujet normal étant en pointillé, on remarque que la courbe des deutéranomaux (D) lui est pratiquement superposable.

IV-2- LES DICHROMATES.

La vision des couleurs de dichromates est nettement plus perturbée que dans les variétés précédentes ; si bien qu'assez souvent, elle se manifeste dans la vie courante par quelques **signes fonctionnels**. On dit couramment que ces sujets **confondent le rouge et le vert**. Ces troubles sont ignorés par le sujet lui-même. L'habitude et l'éducation, dans un entourage voyant normalement les couleurs, font que les dichromates peuvent, en appréciant les différences de luminosité (les jaunes paraissent plus lumineux que les verts et ceux-ci le sont plus que les rouges) nommer, le plus souvent, correctement les couleurs des objets courants, **alors même qu'ils les perçoivent mal**.

IV-2-1- LA RÉTINE DES DICHROMATES EST DIVARIANTE.

Les dichromates ne reproduisent les teintes que par deux primaires seulement (au lieu de trois). **Le triangle de Maxwell s'aplatit en un segment de droite dont les primaires occupent les extrémités**. Les points intermédiaires représentant toutes les impressions colorées possibles ; cependant, la règle du barycentre reste valable.

IV-2-2- COMMENT LES DICHROMATES VOIENT-ILS LE SPECTRE ?

C'est **Dalton** qui a inauguré cette étude. Il était **protanope**. Depuis, on appelle de ce fait, souvent les dichromates : des **Daltoniens**, et le **dichromatisme** : le Daltonisme. Dalton ne voyait dans le spectre que deux teintes qu'il appelait bleu et jaune

séparées par une bande incolore (située dans le bleu vert des sujets normaux). Ce qu'il appelait jaune rassemblait toutes les couleurs spectrales situées entre le rouge et le vert des normaux. Ce dernier lui paraissait plus saturé. Ces résultats de l'auto-observation de Dalton sont généraux pour les dichromates ; leur analyse détaillée permet d'y distinguer deux variétés appelées par **Von Kries** : **protanopes** et **Deutéranopes** qui se distinguent par les caractères suivants :

- Les **protanopes** voient dans le spectre le centre de la bande incolore en moyenne à 495 nm ; de plus, le spectre leur paraît **raccourci dans son extrémité rouge**. Leur courbe d'efficacité lumineuse est pratiquement superposable à celle des protanomaux.
- Les **deutéranopes** ont le centre de leur bande incolore à une longueur d'onde un peu plus grande que celle des protanopes (500 nm). Leur courbe d'efficacité lumineuse et celle des deutéranopes sont pratiquement normales.

IV-2-4- FRÉQUENCE DES DIFFÉRENTES DYSCROMATOPSIES

Le nombre de protanopes ainsi que celui des deutéranopes représente 15% environ des dyschromatopes pour chacune des deux formes.

On rencontre également une forme extrêmement rare de dichromates : les tritanopes, de ce fait beaucoup moins étudiée, possédant deux bandes incolores complémentaires, l'une dans le jaune entre 570 et 580 nm, l'autre dans le violet. Ces sujets confondent le vert et le bleu.

IV-3- LES MONOCHROMATES (ACHROMATOPSIE).

Ils sont excessivement rares, on dénombre 10 cas sur un million de dyschromatopes. Leur sensation visuelle est totalement dépourvue de qualités colorées et peut se caractériser par une seule variable : **ils ne sont sensibles qu'à la luminance**.

Il existe deux types d'achromatopsies :

- La moins exceptionnelle est la **Nyctalopie**, où la rétine du sujet, semblable à celle des oiseaux de nuit, ne contient vraisemblablement que des bâtonnets. Ces sujets n'ont pas de cônes, leur fovéa est aveugle et leur acuité visuelle est mauvaise (ils souffrent, par ailleurs de photophobie).
- Une variété encore plus rare **a conservé l'existence des cônes** ces sujets sont de véritables monochromates ils :
 - sont aptes à **percevoir les variations d'intensité lumineuse**,
 - ont perdu le **pouvoir de distinguer les couleurs**.

IV-4- DIAGNOSTIC DES DYSCROMATOPSIES

On en connaît l'importance à cause de l'élimination de ces sujets de certaines professions. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées cependant, on tend actuellement à employer de plus en plus la méthode la plus rapide, et souvent plus fine, celle des tables d'**Ishihara**.

IV-4-1- LA MÉTHODE DES TABLES D'ISHIHARA.

Le test présenté est un chiffre, une lettre ou une figure réalisés au moyen d'un semi de rond coloré ayant une certaine luminance photopique, que le sujet normal distingue aisément, par contraste de couleurs, du fond du tableau également formé d'un semi de ronds, de même luminance, de couleurs nettement différentes de celles du test.

- Si le sujet est **normal**, il perçoit normalement le test.
- S'il s'agit d'un **dichromate** et si les teintes du semi formant le test et celles du fond sont sur une **droite de confusion** du sujet, celui-ci ne distinguera rien du tout.

Certains tableaux sont communs à tous les dichromates d'autres, jouant sur différence des droites de confusion des protanopes et des deutéranopes permettront de les distinguer. **Les trichromates anormaux pourront être également dépistés par les tests composés au moyen de nuances dont la différence est inférieure à leur seuil différentiel de couleur**.

On arrive ainsi rapidement, en faisant examiner au sujet d'une dizaine à une vingtaine de tableaux bien choisis, à faire un diagnostic assez précis.

EVALUATION FORMATIVE

Test 1.

On a comparé au photomètre à papillotement, en vision photopique deux lumières monochromatiques de longueur d'onde λ_1 et λ_2 . On a constaté la disparition du papillotement pour un rapport de brillances énergétiques : $\frac{B_1}{B_2} = 100$

1- a- Comparer les luminances L_1 et L_2 lors de la disparition du papillotement.

b- Exprimer et calculer le coefficient d'efficacité lumineuse relatif de la lumière n° 2 par rapport à celui de la lumière n° 1

2- On divise par 1000 le niveau énergétique des deux lumières et l'on constate que la lumière n° 2 n'est plus perçue alors que la couleur de la lumière n° 1 n'est plus perçue. Si $\lambda_1 = 550 \text{ nm}$, quelle est la couleur de la lumière n° 2.

3- On projette sur la même surface d'un écran blanc parfaitement diffusant ces deux lumières avec des luminances telles que le rapport soit alors égal à 2. Si les deux lumières considérées sont les primaires d'un système colorimétrique, placer le point P représentant la lumière résultante sur le triangle des couleurs. Quelle couleur aura-t-elle ?

Test 2.

1- Définir ce que sont deux couleurs complémentaires.

2- En utilisant le triangle de Maxwell, indiquer les tonalités des couleurs complémentaires du jaune et du vert. Peut-on les caractériser chacune par une longueur d'onde ?

Test 3.

Dans un système colorimétrique, on a choisi pour primaires, des lumières monochromatiques de longueurs d'onde respectives de $\lambda_1 = 700$, $\lambda_2 = 540$ et $\lambda_3 = 400 \text{ nm}$. Les unités lumineuses des primaires ont été choisies de telle sorte que le blanc soit au centre géométrique d'un triangle équilatéral de type Maxwell.

1- Tracer l'allure du lieu du spectre réel.

2- Placer dans le triangle le point représentatif d'une lumière de coefficients trichromatiques $g_1 = 0,2$, $g_2 = 0,2$ et $g_3 = 0,6$.

3- Indiquer sur le schéma, la position sur le spectre de la longueur d'onde dominante et celle de son complémentaire. Quelles sont leurs tonalités ?

Test 4.

Le résultat de l'analyse spectroscopique d'une lumière A qui paraît blanche à un observateur normal, montre qu'elle est constituée de trois raies monochromatiques :

* une rouge : $\lambda_R = 700 \text{ nm}$ * une verte : $\lambda_G = 530 \text{ nm}$ * une bleue : $\lambda_B = 450 \text{ nm}$

1- Placer le point M représentant la lumière A dans le triangle équilatéral de Maxwell admettant pour primaires IR, IG et IB.

2- Calculer les coefficients trichromatiques de la lumière A sachant que la complémentaire de λ_B est une lumière de longueur d'onde $\lambda = 550 \text{ nm}$ et que les proportions des luminances rouge et vert qui la constituent sont égales.

Test 5.

1- Un sujet ne peut pas faire la différence, dans la rue entre un feu rouge et un feu vert indépendamment de leur position. Ils lui paraissent de même teinte.

2- Les ayant repérés par leur position, le feu rouge lui paraît beaucoup moins lumineux.

Quelle est la variété la plus probable de la dyschromatopsie de ce sujet.

Test 6.

La nuit, le sujet normal comme le sujet protanope confondent un objet noir et blanc avec un autre rouge et blanc. Justifier la réponse.

Test 7.

Un écran blanc de 1 m^2 de surface comprenant deux parties A et B.

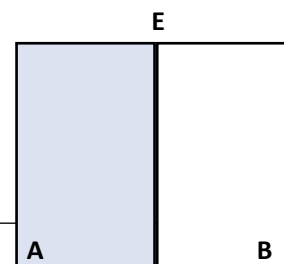
La partie A est blanche parfaitement diffusante, la partie B paraît rouge à un observateur (S) normal lorsqu'elle est éclairée par une lumière naturelle diurne.

On éclaire l'écran E :

a- par une lumière blanche.

b- par une lumière jaune monochromatique (589 nm).

1- De quelle couleur paraîtront les parties A et B au sujet S dans le cas (a) et (b) en vision photopique ?



2- De quelle couleur paraîtront les parties A et B au sujet S dans le cas (a) et (b) en vision scotopique ?

3- De quelle couleur paraîtront les parties A et B à un sujet protanope dans le cas (a) et (b) en vision photopique ?

On rappelle : le sujet protanope est un dichromate qui possède les récepteurs du vert et du bleu, le rouge est perçu par sa luminance.

Test 8.

Un sujet observe une plage peinte en rouge.

a- Quand la plage est éclairée par un faisceau de lumière blanche d'intensité I , sa luminance est $L = 10^{-4}$ nit. Le sujet ne la perçoit pas.

b- Quand la plage est éclairée par un faisceau de lumière blanche d'intensité largement supérieure à I , sa luminance est $L = 10$ nit. Le sujet la perçoit jaune.

c- Quand la plage est éclairée par un faisceau de lumière verte de luminance $L = 10$ nit. Le sujet ne la perçoit pas.

1- Quelles conclusions peut-on tirer de ces trois expériences ? Ce sujet est-il normal ? Si non préciser le trouble dont il est atteint. Justifier les réponses.

2- Comment percevra-t-il la plage si elle était éclairée par un faisceau de lumière rouge dans les deux cas suivants :

a- $L = 10$ nits.

b- $L = 10^{-4}$ nit.

Test 9.

Un sujet regarde un écran blanc parfaitement diffusant, éclairé par un faisceau de lumière rouge de luminance L .

Associer les propositions suivantes :

1- Sujet normal ; $L = 10^{-5}$ nit

2- Sujet protanope ; $L = 10^{-2}$ nit

3- Sujet protanope ; $L = 10^{-5}$ nit

4- Sujet normal ; $L = 10^{-2}$ nit

Aux affirmations :

a- La plage n'est pas vue.

b- La plage est vue, sa couleur est rouge.

c- La plage est vue, sa couleur n'est pas rouge.

Remarque : le sujet protanope est un dichromate qui possède les récepteurs du vert et du bleu.

LA PSYCHO-ACOUSTIQUE

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. citer les trois qualités physiologiques d'une sensation sonore et expliquer leur relations avec les grandeurs physiques
2. connaître la différence entre seuil absolu et seuil différentiel relatif
3. décrire les mécanismes de l'orientation auditive en audition binaurale

Elle étudie les relations qui existent entre le stimulus sonore s et la sensation auditive qu'il provoque S . D'après la loi de Weber la variation liminaire perceptible d'une stimulation Ds est proportionnelle à l'intensité du stimulus s d'où la relation

$$\frac{\Delta s}{s} = \text{cste}$$

I - LES QUALITÉS PHYSIOLOGIQUES D'UN SON

Un son périodique est défini par trois paramètres physiques :

- * sa fréquence fondamentale
- * sa puissance acoustique
- * son spectre

À ces trois paramètres physiques correspondent approximativement trois qualités physiologiques donc subjectives, qui sont dans l'ordre « respectivement ».

- * la hauteur ou tonie
- * l'intensité ou sonie
- * le timbre.

I.1 - HAUTEUR OU TONIE

I.1.1 - DÉFINITION :

C'est la qualité qui permet d'affirmer qu'un son est aigu ou grave, cette qualité est essentiellement liée à la fréquence.

$$H = f(N)$$

Un son paraît d'autant plus aigu que sa fréquence est plus élevée.

20 Hz	fréquences	20.000 Hz
infra-sons (I.S)	audibles chez l'homme	ultra-sons (U.S)
←—————→		

I.1.2 - SEUIL DIFFÉRENTIEL RELATIF DE FRÉQUENCE S.D.F = $\frac{\Delta N}{N}$

Si l'on fait entendre 2 sons de même intensité, de fréquence respective N et $N + DN$ et que l'on cherche la plus petite valeur de DN qui donne une sensation de hauteur distincte, on constate que dans un large domaine de fréquence le rapport

$$\frac{\Delta N}{N} = \text{cste}$$

Le S.D.F varie selon les sujets. Pour la moyenne de la population, on admet la valeur de

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{1}{80} \quad \text{Certaines oreilles très musiciennes peuvent descendre jusqu'à} \quad \frac{1}{1000}$$

I.2 - INTENSITÉ SONORE OU SONIE

I.2.1 - DÉFINITION

C'est la sensation qui nous fait dire qu'un son paraît fort ou faible, cette sensation est essentiellement liée à la puissance surfacique acoustique, mais dépend aussi de la fréquence. En effet deux sons de même puissance acoustique, mais de fréquence différente auront une sonie différente.

I.2.2 - LE PHONE

C'est une unité physiologique sans dimension traduisant le niveau d'isophonie (courbes isophoniques) alors que le décibel est une unité physique du niveau de puissance acoustique égale à 10 fois le logarithme décimal d'un rapport de puissance acoustique ou à 20 fois le logarithme décimal d'un rapport de pression acoustique.

$$n \text{ dB} = 10 \log \frac{W_2}{W_1} = 20 \log \frac{P_2}{P_1}$$

À 1000 Hz l'échelle des phones est la même que celle des décibels.

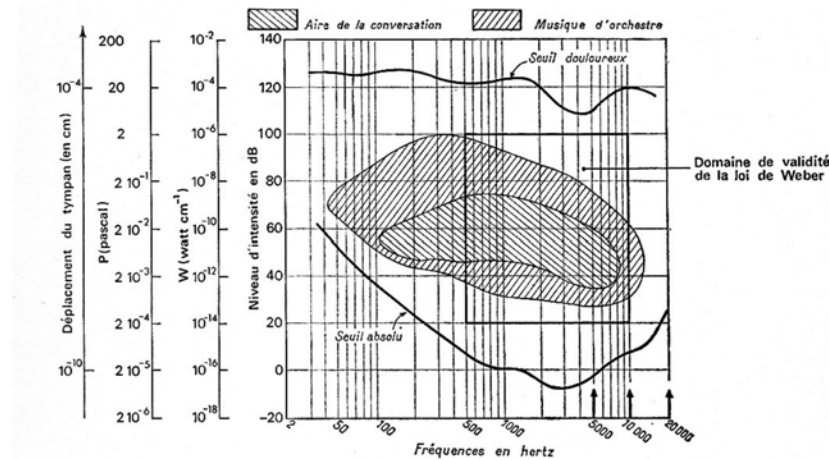
I.2.3 - SEUIL ABSOLU

C'est la puissance acoustique la plus petite qui produit une sensation sonore. Le seuil absolu varie avec la fréquence, il passe par un minimum très évasé entre 1000 et 5000 Hz.

Si on augmente suffisamment la puissance surfacique d'un son, la sensation sonore devient douloureuse et on peut alors tracer la courbe du seuil douloureux.

La surface comprise entre les courbes de **seuil absolu** et de **seuil douloureux** s'appelle le **champ auditif tonal** (Fig 6).

Fig 6 : Champ auditif tonal



Le seuil absolu à 1000 Hz ($W = 10^{-16}$ Watt/cm²) est pris comme niveau zéro pour les décibels absolus

I.2.4 - SEUIL DIFFÉRENTIEL RELATIF DE PUISSANCE ACOUSTIQUE $\frac{\Delta W}{W}$

Pour la sonie, la loi de Weber n'est presque plus valable, car $\frac{\Delta W}{W}$ n'est pas constante, mais varie avec la fréquence et pour une fréquence donnée, elle varie avec l'intensité.

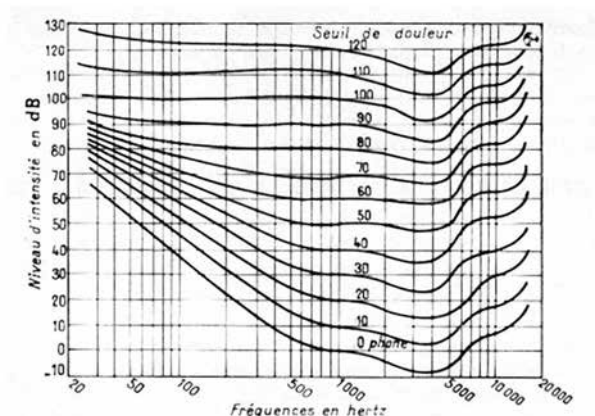
Entre 20 et 100 dB la loi de Weber est à peu près valable : $\frac{\Delta W}{W} = \text{constante}$

$\frac{\Delta W}{W}$ vaut environ 0,20.

On peut calculer que l'augmentation correspondante de niveau acoustique est de 0,83 dB.

Très fréquemment, on admet que le seuil différentiel relatif correspondrait à une variation de niveau de 1 dB (Fig 7).

Fig 7 : Courbes isophoniques



I.3 - LE TIMBRE :

I.3.1 - DÉFINITION

C'est la qualité qui permet de distinguer 2 sons de même hauteur et de même sonie, mais émis par 2 instruments différents, l'oreille est capable de réaliser l'analyse harmonique d'un son complexe.

Le timbre est directement lié au spectre et il correspond à la richesse en harmonique.

Le nombre des timbres perçus comme distincts est extrêmement grand alors que dans la vision, une sensation visuelle élémentaire peut être ramenée à 3 paramètres (trivariance visuelle)

Pour l'audition le phénomène est plus complexe puisqu'au niveau de l'oreille interne, un son complexe subit une analyse en harmoniques (Analyse de Fourier) qui se continue et se complète au niveau des voies acoustiques et peut être même jusque dans les centres nerveux.

I.4 - LA CONSTANTE DE TEMPS

C'est la durée d'écoute minimale d'un son : elle est de 10 ms pour reconnaître la hauteur d'un son et de 100 ms pour évaluer l'intensité sonore.

II - AUDITION BINAURALE

Par rapport à l'audition monaurale, l'audition avec les deux oreilles permet d'augmenter la sensation de sonie et de reconnaître les différences de phase et de temps d'arrivée des sons dans les 2 oreilles.

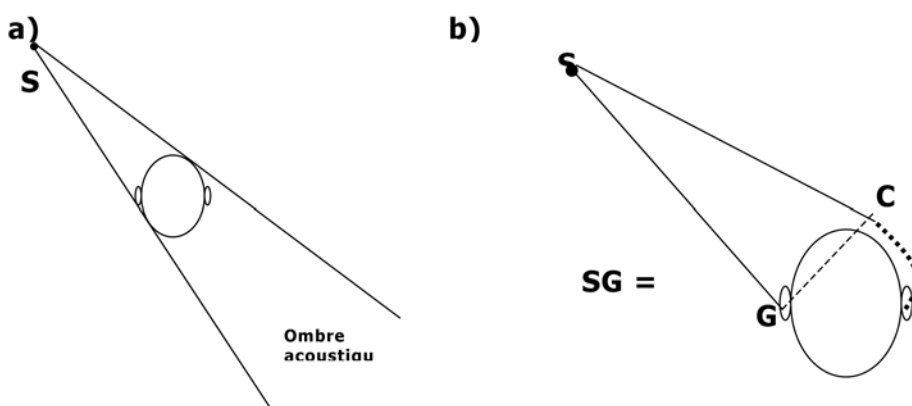
La sensation de sonie est améliorée de 3 dB au niveau liminaire et de 6 dB pour des niveaux supra-liminaires en audition binaurale.

La différence de phase permet l'orientation auditive pour les basses fréquences < 800 Hz (Fig 8) : la localisation des sources acoustiques aériennes provient essentiellement des différences de phase entre les ondes acoustiques reçues dans chaque oreille alors que pour les fréquences > 3000 Hz : la localisation dépend uniquement des différences d'intensité perçues par chaque oreille.

* entre 800 et 3000 Hz : l'orientation auditive est moins bonne

* En audition binaurale pour des différences temporelles $< 0,6$ ms, les sons provenant d'une source située à égale distance des deux oreilles paraissent fusionnés et pour des différences temporelles $> 0,6$ ms : chaque oreille perçoit les sons à des moments différents.

Fig 8 : Audition binaurale



a) Effet d'ombre acoustique pour les sons de fréquence élevée ($f > 3000$ Hz, $\lambda < 10$ cm : diffraction négligeable)

b) Trajet des ondes sonores de basse fréquence : (diffraction importante) la différence de marche est égale à CD

III SONS SUBJECTIFS

L'oreille fait subir à une onde sonore des distorsions, voici quelques exemples :

- si l'on fait entendre un son pur très puissant, l'oreille entend également les premiers harmoniques
- si l'on fait entendre simultanément deux sons de fréquence $N1$ et $N2$, l'oreille entend distinctement le son de fréquence $N1$ - $N2$ (son différentiel), et plus faiblement le son de fréquence $N1 + N2$ (son additionnel)

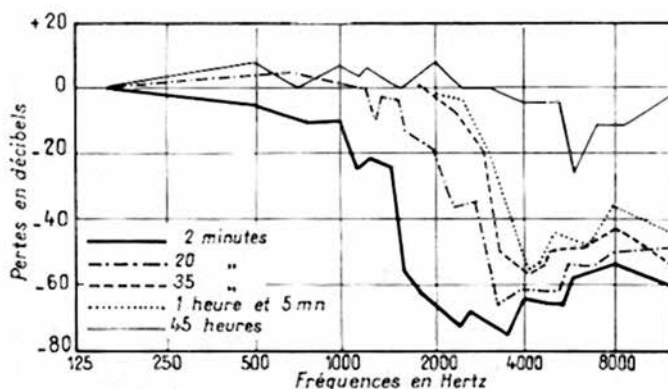
IV - AUDITION SIMULTANÉE DE DEUX SONS : EFFET DE MASQUE

Lorsqu'on fait entendre simultanément à la même oreille deux sons de fréquences différentes, le plus intense (son masquant) gêne l'audition de l'autre (son masqué). On a pu établir qu'un son masque beaucoup un autre son de fréquence supérieure à la sienne, mais très peu un son de fréquence inférieure.

V - LA FATIGUE AUDITIVE

Après l'audition d'un son suffisamment intense, les performances de l'oreille sont moins bonnes, le seuil est plus élevé que normalement (Fig 9). Après une période de récupération plus ou moins longue, l'oreille reprend ses capacités initiales. À cette surdité partielle et transitoire, on donne le nom de fatigue auditive. La fatigue n'est en général pas maximale pour la fréquence du stimulus fatigant, mais pour des fréquences supérieures à celui-ci. En règle générale, parmi les fréquences atteintes, la zone entourant 4000 Hz est la plus touchée et récupère plus lentement que les autres.

Fig 9 : Fatigue auditive



Récupération d'une fatigue auditive après audition d'un son de 2 000 Hz, 130 db, pendant 2 minutes.

EVALUATION FORMATIVE

Test 1 :

Parmi les grandeurs suivantes :

- hauteur d'un son - puissance acoustique - timbre d'un son
- intensité d'un son - amplitude d'un son - sonie d'un son

Quelles sont celles qui sont :

A - De nature physique

B - De nature physiologique

Test 2 :

1) - On fait entendre successivement à un sujet dont le seuil différentiel relatif de fréquence est de $1/80$, deux sons de même puissance acoustique (de l'ordre de 50 dB absolus) dont les fréquences sont respectivement 400 et 402 Hz.

a/ Pourra-t-il déceler que ces sons sont de fréquences différentes ?

b/ En sera-t-il de même si l'on fait entendre ces 2 sons simultanément.

2) - En est-il de même pour a et b du 1/ si les fréquences étaient de 400 et 450 Hz.

Test 3 :

On admet qu'un son dont le niveau de puissance acoustique est supérieur à 70 dB est dangereux pour les systèmes auditifs. On fait entendre à un sujet deux sons de fréquences différentes :

$N_1 = 3000$ Hz, $N_2 = 8000$ Hz de même niveau de puissance acoustique égale à 80 dB.

Quel est le son le plus nuisible (N_1 ou N_2)

TRANSMISSION-TRANSDUCTION

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. décrire le chemin de transmission de l'onde acoustique dans l'oreille
2. expliquer le rôle de la chaîne des osselets dans la conduction aérienne
3. décrire le processus de transduction de l'onde mécanique en un signal électrique
4. citer les différences entre PMC et PA

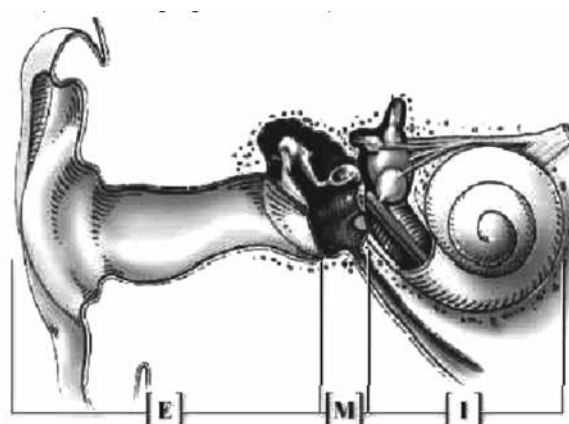
I - LA TRANSMISSION

Les sons peuvent emprunter deux voies de pénétration dans l'oreille :

- l'air pour la conduction aérienne
- les os du crâne pour la conduction osseuse

En conduction aérienne, les sons pénètrent dans l'oreille externe, passent à travers l'oreille moyenne et gagnent les liquides de l'oreille interne (Fig 1).

Fig 1 : Schéma de l'oreille



I.1- TRANSMISSION DANS L'OREILLE EXTERNE (O.E)

L'oreille externe a pour rôle de capter les sons qui se propagent dans le milieu aérien et de les diriger vers la face externe de la membrane tympanique.

Le conduit auditif externe (C.A.E) peut être considéré de façon schématisée comme un tuyau sonore qui a trois caractéristiques :

- * il transforme les ondes sonores sphériques en ondes planes
- * il présente une résonance située aux alentours de 3000 Hz
- * il est le lieu d'interférences à l'origine d'ondes stationnaires.

Le vacuité du C.A.E. est indispensable pour que la propagation s'effectue d'une manière normale.

Le pavillon de l'oreille joue un rôle dans la localisation des sons dans l'espace.

I.2 - LE TYMPAN

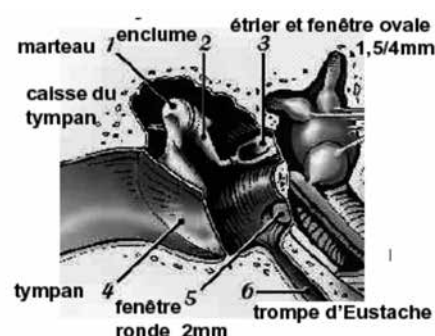
La membrane tympanique reçoit les vibrations acoustiques et les transmet à la chaîne des osselets par l'intermédiaire du manche du marteau qui lui est solidaire.

L'amplitude réelle, des vibrations qui animent la membrane tympanique au cours de la transmission des sons serait (au seuil de l'audition pour un son de 1000 Hz chez un sujet jeune normal) de l'ordre de 10^{-9} cm soit le $\frac{1}{10}$ du diamètre de l'atome d'hydrogène.

I.3 - TRANSMISSION DANS L'OREILLE MOYENNE (O.M)

I.3.1 – LA CHAÎNE TYMPANO-OSSEULAIRE

Fig 2 : Oreille moyenne



Si on assimile schématiquement les liquides de l'oreille interne à de l'eau de mer à 37 °C on constate qu'il est nécessaire d'adapter les impédances acoustiques pour que les sons passent complètement dans la cochlée, (on sait en effet, que $\frac{1}{1000}$ ème seulement de l'énergie incidente E_i passe de l'air à l'eau de mer).

Cette adaptation des impédances fait intervenir plusieurs facteurs dont le plus important est le rapport (17,2) entre la surface utile du tympan (solidaire du marteau), qui est d'environ 55 mm², et la surface de la plaque de l'étrier, soit 3,2 mm². Intervient également le jeu de leviers de la chaîne des osselets (Fig 2,3), le bras du marteau étant plus long que celui de l'enclume, auquel s'ajoutent, pendant le mouvement, les variations d'incurvation des parois du cône tympanique, ce qui a pour effet de multiplier la pression à la fenêtre ovale par 2,6 environ (en même temps que de diminuer la vitesse). Au total, on aurait une pression à la plaque de l'étrier, quarante-cinq fois plus élevée qu'au tympan.

Soit un gain de $(DI = 20 \log 45 = 33 \text{ dB})$

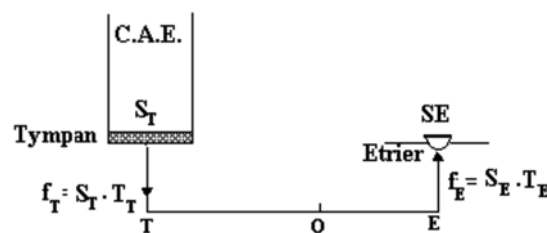


Fig 3 : Effet de levier

I.3.2 – LA TROMPE D'EUSTACHE

Pour que la membrane tympanique puisse vibrer convenablement il est nécessaire qu'une même pression s'exerce sur ses 2 faces. Or des différences de pression peuvent survenir entre l'O.E et l'O.M.

Exemples :

- * En altitude il y a diminution de la pression atmosphérique, en ouvrant la bouche ou simplement par un mouvement de déglutition de la salive, on rétablit la pression en faisant communiquer l'O.M avec les voies aériennes supérieures qui sont à la même pression que la pression atmosphérique.
- * En plongée sous-marine, c'est le phénomène inverse. En faisant « la manœuvre de Valsalva qui consiste à bloquer la respiration en inspiration profonde, on augmente la pression qui règne dans les voies aériennes supérieures et donc celle de l'oreille moyenne.

Donc la trompe d'Eustache qui réunit la caisse du tympan avec les voies aériennes supérieures permet de maintenir un état d'équipression entre l'O.M et l'O.E grâce à un mouvement passif de l'air.

Remarque : Au repos, la trompe d'Eustache est fermée elle s'ouvre au cours des déglutitions ou des bâillements, mais jamais pendant la phonation.

I.3.3 - MUSCLE DES OSSELETS

Le muscle du marteau en se contractant a pour effet de tendre la partie inférieure du tympan.

Le muscle de l'étrier (qui bouche la F.O) en se contractant attire la platine de l'étrier en dehors.

La contraction des muscles de l'O.M modifie l'impédance de la chaîne tympano-ossiculaire et donc son aptitude à transmettre les sons, ces muscles auraient plusieurs effets :

- * **Accommodation** : Leur contraction favoriserait les sons aigus
- * **Cohésion** de la chaîne des osselets
- * **Protection contre les sons intenses** : Les sons intenses provoquent une contraction des muscles de l'O.M. Il s'agit d'une réponse réflexe bilatérale et synergique qui se déclenche pour un niveau acoustique de 70 à 90 dB. Le temps de latence de ce réflexe varie habituellement de 60 à 150 ms.

La protection apportée par ce mécanisme est limitée :

- en niveau : atténuation de 10 dB seulement
- en durée : les muscles sont fatigables si bien que la durée totale de la contraction inefficace pour des sons d'installation très brusque (explosion)

* La localisation des sons dans l'espace

- * **L'attention auditive** : Les muscles ossiculaires aideraient au maintien de l'attention auditive

I.4 - TRANSMISSION DANS L'OREILLE INTERNE (O.I)

La transmission dans l'oreille interne se fait par la mise en mouvement des fenêtres (F.O et F.R), des liquides périlympatiques (dans les rampes vestibulaire et tympanique) et endolymphatique (dans le canal cochléaire) et aussi par le mouvement des membranes et des cils des cellules ciliées (Fig 4).

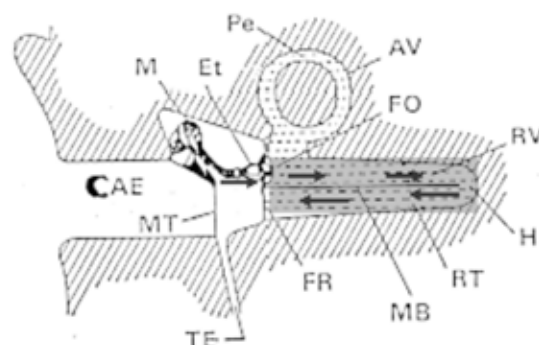


Fig 4 : Transmission dans l'O.I

I.4.1 – MOUVEMENT DES FENÊTRES

Les liquides étant incompressibles leur mouvement n'est possible que s'il existe une voie d'expansion : ce rôle est joué par la fenêtre ronde (F.R).

I.4.2 – MOUVEMENT DES LIQUIDES

I.4.2.1 - Liquide périlymphatique dans les rampes vestibulaire, et tympanique :

Le déplacement du liquide périlymphatique dû au mouvement des fenêtres varie suivant la fréquence.

Pour des vibrations de très basses fréquences (< 20 Hz) c'est l'ensemble de la colonne liquide comprise dans les 2 rampes qui se déplace en bloc en passant à travers l'hélicotrema (c'est un conduit qui va séparer la colonne au niveau de la rampe vestibulaire (R.V) et la colonne au niveau de la rampe tympanique (R.T))

Pour des vibrations de fréquences plus élevées (> 20 Hz) l'impédance mécanique de l'hélicotrema (qui est un orifice de très petit diamètre) augmente et devient telle que les mouvements des liquides sont bloqués à son niveau. Les mouvements des liquides se feront par une autre voie offrant une résistance plus faible (---> déformation des membranes).

I.4.2.2 - Liquide endolymphatique et canal cochléaire :

Cette voie de moindre résistance est le canal cochléaire. En effet pour les fréquences audibles, les mouvements des liquides se font en déformant les membranes du canal cochléaire c'est-à-dire la membrane de Reissner, la membrane basilaire ainsi que l'organe de Corti et la membrane tectoriale. Par conséquent chaque déplacement de la platine de l'étrier dans la fenêtre ovale mobilise, pour des vibrations de fréquence > 20 Hz et < 20.000 Hz, une partie du canal cochléaire et son contenu (ceci ne peut se faire que si la F.R est libre de jouer son rôle d'expansion).

I.4.3 – MOUVEMENT DES MEMBRANES

Seule la membrane basilaire va jouer un rôle actif dans la transmission. C'est une membrane biologique d'élasticité croissante depuis la base jusqu'au sommet (Élasticité de 1 à 100), elle s'élargit de la base 0,05 mm à l'apex 0,50 mm (Fig 5).

Les autres membranes cochléaires présentent par contre une élasticité uniforme, leurs mouvements sont commandés par la membrane basilaire qui a les caractéristiques physiques d'un système oscillant particulier.

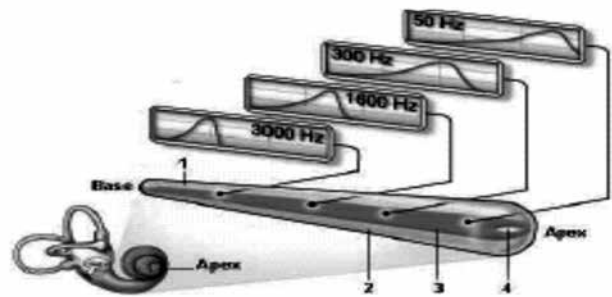


Fig 5 : Sélectivité de la membrane basilaire

I.4.4 – MOUVEMENT DES CILS ET DES CELLULES CILIÉES

L'organe de Corti est essentiellement constitué de cellules sensorielles appelées cellules ciliées elles sont séparées par le tunnel de Corti en 2 groupes :

- Les cellules ciliées internes disposées en une seule rangée tout au long de la cochlée.
- Les cellules ciliées externes disposées en plusieurs rangées.

L'extrémité inférieure des cellules ciliées repose sur des cellules de soutien non sensorielles et avoisine les extrémités des fibres nerveuses.

L'extrémité supérieure porte des cils qui traversent la lame réticulaire et vont s'insérer dans la membrane tectoriale qui coiffe tout l'organe de Corti (Fig 6).

Quand la membrane basilaire oscille, les cils vont osciller à leur tour selon un mouvement oscillatoire dit de cisaillement, ainsi les **mouvements de la platine de l'étrier aboutissent aux vibrations des cils des cellules sensorielles : c'est le phénomène mécanique fondamental de l'audition.**

L'amplitude du mouvement des cils dépend de l'amplitude des ondes propagées et de la position de la cellule ciliée sur la membrane basilaire. Cette amplitude est donc fonction de la fréquence du son stimulant.

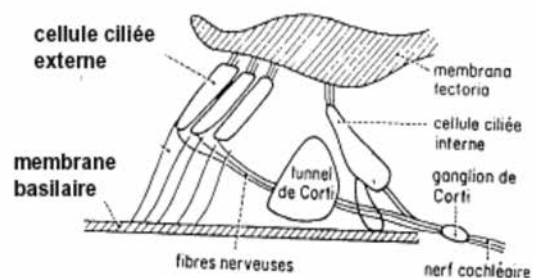


Fig 6 : Organe de Corti

I.5 - CONDUCTION OSSEUSE

L'expérience prouve qu'une vibration de fréquence convenable imposée au crâne donne une sensation auditive, ce fait est utilisé dans les épreuves fonctionnelles de l'audition. On a pu démontrer qu'il y a deux comportements vibratoires du crâne.

1 - aux basses fréquences (< 1500 Hz) : le crâne se déplace dans son ensemble sans se déformer en vibrant à la même fréquence que la source excitatrice : il subit donc un mouvement alternatif de translation.

Dans ce cas la stimulation est liée à l'inertie de la chaîne des osselets et des structures intracochléaires puisqu'en effet lorsqu'on place le vibreur sur l'os frontal on recueille des potentiels en phase, par contre si le vibreur est placé sur la mastoïde on recueille des potentiels en opposition de phase.

2 - aux fréquences élevées (> 1500 Hz) : le crâne présente des déformations c'est-à-dire des alternances de dilatation et de contraction, ces déformations vont à leur tour soumettre la cochlée dans son ensemble à une compression alternative de fréquence égale à la fréquence du vibreur.

Donc dans les deux cas (HF et BF) les vibrations mettent en mouvement la membrane basilaire et entraînent une vibration alternative des cils des cellules ciliées (sensorielles).

La conduction osseuse (mode de stimulation acoustique) demande plus d'énergie que la conduction aérienne pour engendrer une sensation auditive. Il existe une différence de l'ordre de 35 décibels entre les seuils auditifs en conduction aérienne et en conduction osseuse.

Remarque : En conduction osseuse, les deux oreilles étant stimulées ensemble il est nécessaire en exploration fonctionnelle d'assourdir l'oreille controlatérale non explorée.

II - LA TRANSDUCTION

II.1 - LA COCHLÉE A L'ÉTAT DE REPOS : POTENTIEL PERMANENT

La cochlée contient plusieurs liquides séparés par des membranes différentes, au repos ces divers milieux diffèrent les uns des autres par leur concentration ionique en ions solvatés Na^+ , K^+ et Cl^- , ce gradient de concentration engendre une ddp. Par rapport au liquide péri-lymphatique pris comme référence, le liquide endolymphatique est fortement positif (+80 → 100 mV) alors que le milieu interne des cellules ciliées est négatif (-40 mV) par rapport au liquide périlymphatique.

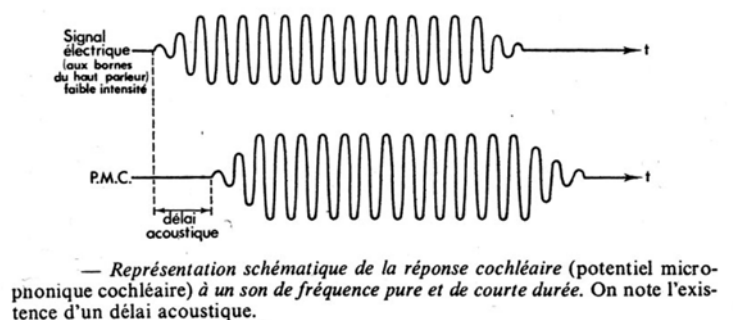
II.2 - LA COCHLÉE APRÈS STIMULATION

Les potentiels produits au cours de la stimulation sont de deux ordres :

II.2.1 - LES POTENTIELS PROPREMENT COCHLÉAIRES OU POTENTIEL DE RÉCEPTEUR

Ces potentiels prennent naissance au niveau de la cochlée et se distinguent en potentiel microphonique et potentiel de sommation :

Fig 7 : Potentiel Microphonique Cochléaire



II.2.1.1 - Potentiel microphonique cochléaire : (PMC)

Il reproduit fidèlement la forme de l'onde sonore de sorte qu'à l'aide d'un amplificateur et d'un haut-parleur on peut utiliser une oreille comme un véritable microphone d'où le nom

Un délai acoustique est nécessaire à la transmission de l'onde sonore à travers les structures anatomiques de l'oreille moyenne et de l'oreille interne.

Le P. M. C (Fig 7) possède un certain nombre de caractéristiques :

- 1 - il reproduit la forme du son qui lui donne naissance, c'est un phénomène alternatif sinusoïdal si le son est pur
- 2 - il est très sensible à l'anoxie
- 3 - il apparaît sans seuil discernable mis à part le délai acoustique
- 4 - son amplitude est proportionnelle au logarithme de l'intensité du stimulus jusqu'à un niveau acoustique de 80 dB, au-delà, la relation n'est plus linéaire et un plateau apparaît vers 100 dB.
- 5 - il existe un phénomène d'**hystérésis** cochléaire : c'est-à-dire si à partir des niveaux élevés on diminue progressivement l'intensité acoustique, on constate que la courbe de la - sortie P.M.C en fonction - entrée acoustique passe par des valeurs inférieures à celles retrouvées lorsqu'on commence par des intensités acoustiques faibles et qu'on les augmentait progressivement.

Ceci serait dû à un phénomène purement mécanique et à un phénomène de fatigue.

II.2.1.2 - Potentiel de sommation

- 1 - il apparaît pour des niveaux plus élevés (Fig 8), 20 dB de plus que le seuil d'apparition du PMC
- 2 - c'est un phénomène local continu et peu sensible à l'anoxie
- 3 - il s'enregistre sous la forme d'une variation de potentiel, lente unidirectionnelle et négative se superposant au P.M.C et dont la valeur est mesurée du milieu du P.M.C à la ligne isoélectrique
- 4 - ce potentiel est proportionnel au logarithme de l'intensité du stimulus et ne paraît pas présenter de non-linéarité dans les limites des stimulations acoustiques habituelles (---> 120 dB au maximum).

Remarques

- 1 - On a pu montrer l'existence d'une corrélation entre ces potentiels de récepteurs et l'inclinaison des cils qui provoque dans un sens une dépolarisation et dans l'autre sens une hyperpolarisation.
- 2 - Les cellules ciliées responsables d'un P.M.C ne sont dépolarisées qu'à chaque 1/2 cycle par contre les cellules responsables du potentiel de sommation sont dépolarisées pendant toute la durée du stimulus.
- 3 - Ces dépolarisations sont dues à des modifications de perméabilité des membranes aux ions : modifications provoquées par les mouvements des cils.
- 4 - les 2 potentiels de récepteur seraient les intermédiaires nécessaires à la genèse des potentiels générateurs et des potentiels d'actions des premiers neurones.

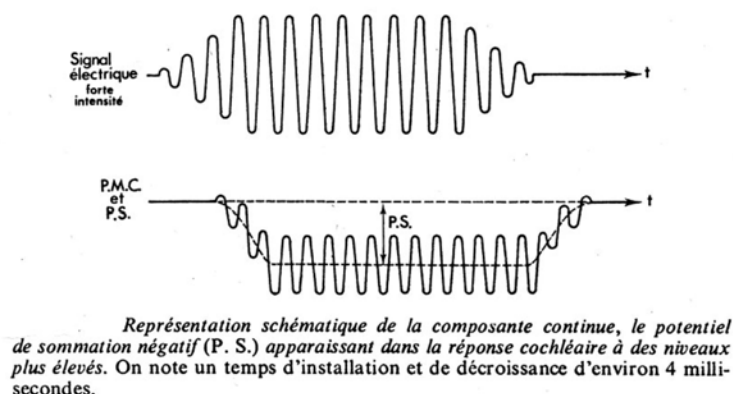


Fig 8 : Potentiel de sommation

II.2.2 - LES POTENTIELS D'ACTIONS DU NERF AUDITIF

L'énergie acoustique étant convertie par l'organe de Corti en énergie bioélectrique qui va donner naissance à un potentiel d'action (Fig 9), celui-ci va se propager le long du nerf auditif jusqu'au centre de l'aire corticale. Ce potentiel d'action est semblable à n'importe quel potentiel d'action de n'importe quel nerf.

La période réfractaire est de 1 ms si bien que la cadence des spikes ne peut dépasser 1000/s

Le nerf auditif qui est le 1er neurone ou neurone cochéo-bulbaire est formé de quelques 30.000 fibres parallèles qui vont faire relais avec le 2e neurone ou neurone bulbo-thalamique qui à son tour va faire relais avec le soma qui va faire relais avec le 3e neurone dont les axones gagnent l'aire auditive primaire dans le lobe temporal.

Ainsi pour coder un phénomène acoustique le nerf acoustique auditif dispose de 30.000 câbles dont chacun peut transmettre au maximum 1000 influx/s.

C'est donc en jouant sur le nombre et la spécialisation des fibres d'une part et la cadence des influx transportés par ces fibres d'autre part que le nerf auditif peut rendre compte de la fréquence et de l'amplitude d'un son sinusoïdal.

De leurs côtés, les centres reconnaissent dans le message auditif au moins 3 qualités :

- sa nature acoustique par l'apprentissage
- sa fréquence
- son intensité.

Fig 9 : Potentiel d'action global

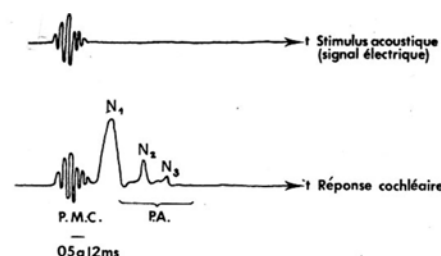


FIG. 38. — Réponse cochléaire à un son bref.

P. M. C. : potentiel microphonique cochléaire

P. A. : potentiel d'action global.

La stimulation à l'aide d'un son bref permet d'isoler, en fonction du temps, le P. M. C. du P. A. (N_1) dont le temps de latence varie de 0,5 à 1,2 ms environ.

Potentiel d'action global (P. A.). Caractéristiques. — Habituellement on distingue trois potentiels appelés : N_1 , N_2 et N_3 . Le premier et le plus important, le potentiel N_1 , très sensible à l'anoxie apparaît après un temps de latence qui varie de 0,7 à 1,2 msec suivant que l'intensité du stimulus acoustique est forte ou faible ; sa durée est d'environ 1 msec, son amplitude augmente progressivement avec le niveau acoustique (il n'obéit pas à la loi du tout ou rien).

EVALUATION FORMATIVE

Test 1 :

1) - Peut-on considérer que la transmission de l'énergie acoustique se fait directement du milieu aérien aux liquides de l'oreille interne (assimilés à de l'eau de mer).

2) - Expliquer alors par quel moyen l'énergie acoustique du milieu aérien est transmise quasi intégralement à la cochlée. Sachant que : la pression acoustique au niveau de la fenêtre ovale est de l'ordre de 45 fois celle au niveau du tympan.

3) - Dans le cas de la destruction de la chaîne des osselets d'un sujet, calculer en dB l'élévation de son seuil absolu. ($\log 2 = 0,3$, $\log 3 = 0,48$)

Test 2 :

Quelles sont les principales propriétés des potentiels micro-phoniques.

Test 3 :

Comparer entre le potentiel microphonique et le potentiel d'action :
origine - forme - fréquence - amplitude.

Test 4 :

Quelles sont les principales propriétés :

1) - du potentiel microphonique

2) - du potentiel d'action élémentaire

3) - du potentiel d'action global

Test 5 :

Analogies et différences entre le potentiel microphonique et le potentiel d'action du nerf auditif.

Test 6 :

Dans les nerfs sensoriels se propagent habituellement des trains de potentiels d'action. La fréquence de ces trains a-t-elle une limite et, si elle en a une, pourquoi ?

Test 7 :

Parmi les propositions suivantes : lesquelles sont exactes :

- 1) - Le P. microphonique n'est pas simultané au son qui le produit.
 - 2) - Le P. d'action élémentaire est simultané au son qui le produit.
 - 3) - L'amplitude du p. m varie avec l'intensité du son stimulant.
 - 5) - Le p.m existe si faible que soit l'intensité du son stimulant.
 - 6) - Le p.m a une période réfractaire.
 - 7) - Le p.a élémentaire reproduit fidèlement la forme de l'onde sonore
 - 8) - Le potentiel de sommation survient avec un seuil et se superpose au potentiel microphonique.
-

Test 8 :

Membrane basilaire. Principales propriétés.

Test 9 :

Pourquoi la destruction de la chaîne des osselets entraîne-t-elle une perte importante de l'audition ?

EXPLORATION DE L'AUDITION

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. citer les types de surdités
2. choisir la technique d'exploration adaptée
3. interpréter un audiogramme
4. expliquer le phénomène de distorsion

L'exploration de l'audition vise à :

- dépister la surdité (hypoacousie) et à
- restituer les fonctions auditives

On distingue cinq types de surdités :

- de transmission : lésion de l'O.E ou de l'O.M
- de perception : lésion de l'O.I
- mixtes (transmission et perception)
- rétrocochléaires : lésion du nerf auditif
- centrales.

I - EXAMEN SUBJECTIF DE L'AUDITION

Il nécessite une salle insonorisée et une technique

Deux méthodes sont utilisées :

- L'acoumétrie
- L'audiométrie

Dans chacune de ces méthodes, le sujet a une participation active, la compréhension et la bonne foi totale sont nécessaires. On obtient des résultats statistiques dont la précision dépend de l'état du sujet et de son entraînement à répondre aux tests sonores.

I.1 - L'ACOUMÉTRIE

Elle a été la première méthode et elle fait appel au diapason et à la voix.

- Une oreille normale entend la voix chuchotée à 6 m et la voix haute à 40 m. On peut apprécier la distance maximale d'audition (pour les aigus) en utilisant une montre.
- Les examens au diapason permettent de mesurer la durée d'audition (d). En effet le diapason donne une oscillation amortie et le temps de vibration est toujours le même pour un diapason donné.
- En conduction aérienne (**C.A**) le diapason est placé à 2 cm du conduit auditif externe (pour les fréquences élevées, on obture l'oreille opposée).
- En conduction osseuse (**C.O**) le pied du diapason est placé sur la mastoïde en audition monaurale et sur le front en audition binaurale.
- Pour une oreille normale $d.C.O(R) < d.C.O(A)$
(R) : relative (sans obturation) - (A) : Absolue (avec obturation)
 $d.C.O$: durée de conduction osseuse.
 $d.C.A$: durée de conduction aérienne.

I.1.1 - ÉPREUVE DE SCHWABACH : ON MESURE D.C.O

- Pour un sujet normal $d.C.A = 100$ s, $d.C.O = 30$ s et $\frac{d.C.A}{d.C.O} \approx 3$
 $d.C.A(R) > d.C.O(R)$
- Si $d.C.O < 30$ s : surdité de perception ou rétrocochléaire

I.1.2 - ÉPREUVE DE RINNE :

Comparaison entre d.C.O et d.C.A pour une même oreille

- **Rinne -** : d.C.A ↓ d.C.O = cste et $\frac{d.C.A}{d.C.O} \downarrow \rightarrow$ Surdité de transmission, car (C.A) ↓

- **Rinne +** : d.C.A ↓ d.C.O ↓ dans des proportions comparables

Exemple d.C.A = 60 s et d.C.O = 18 s => Surdité de perception ou rétrocochléaire

I.1.3 - ÉPREUVE DE WEBER :

Ici le diapason est sur le sommet de la tête (le front)

- Le sujet normal entend également des deux oreilles (fig 1)

- Le sujet entend plus fort du côté atteint

(Weber latéralisé du côté malade) :

Surdité unilatérale de transmission (fig 2)

- Le sujet entend plus fort du côté sain

(Weber latéralisé du côté sain) : Surdité de perception (fig 3)



Fig 1



Fig 2



Fig 3

I.2 - L'AUDIOMÉTRIE

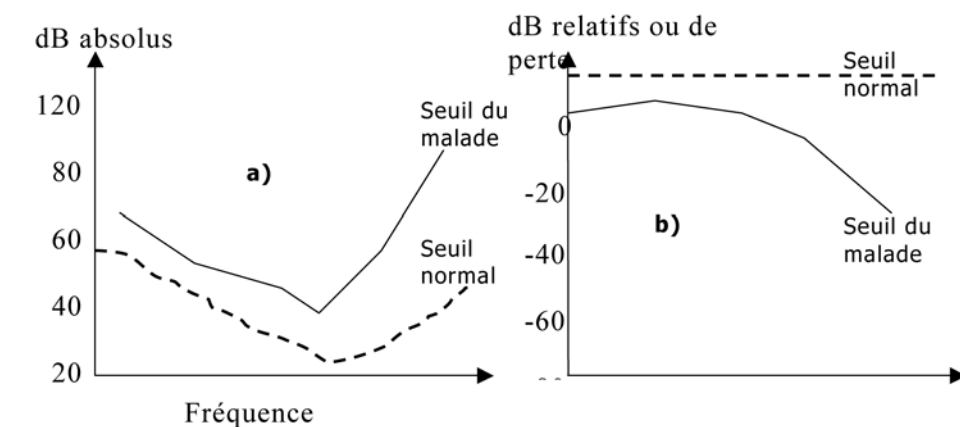
L'audiométrie est plus utilisée que l'acoumétrie, c'est une méthode rapide et sa précision est suffisante. On distingue trois épreuves audiométriques.

I.2.1 - L'AUDIOMÉTRIE TONALE LIMINAIRE

C'est la recherche du seuil liminaire de puissance acoustique en fonction de la fréquence. La technique nécessite un audiom tre tonal qui comprend :

- un générateur de basses fréquences qui nous permet d'avoir des sons purs indemnes de toute harmonique.
- un amplificateur
- un atténuateur d'affaiblissement de 5 à 5 dB
- une paire d'écouteurs
- un vibreur
- un générateur de « bruit blanc » pour assourdir l'oreille non étudiée (on admet des erreurs de 5 dB).

Fig 4 : Audiogrammes



a) exprimé en dB absolus ;

b) en dB de perte

Les résultats sont représentés sur un audiogramme en dB absolus et en dB de perte (Fig 4).

$$I_{dB} \text{ de perte} = I_{dB} \text{ absolu du sujet} - I_{dB} \text{ absolu du sujet normal}$$

En (C.A) on utilise l'écouteur et en (C.O) le vibreur est placé sur la mastoïde en audition monaurale.

Exemple de surdité de transmission

- surdité globale avec une certaine prédominance sur les graves (fig 5).
- La conduction osseuse peut être considérée comme normale.

Exemple de surdité de perception

- Il s'agit d'une surdité   prédominance très nette pour les aigus (fig 6).
- Altération parallèle des conductions osseuse et aérienne.

1.2.2 - L'AUDIOMÉTRIE TONALE SUPRA-LIMINAIRE

C'est la recherche des distorsions des sensations sonores :

- Le recrutement = distorsion de la sensation d'intensité sonore
- La displacousie = distorsion de la sensation de hauteur.

Le phénomène de recrutement est particulièrement important, il est spécifique des lésions de l'organe de Corti.

Le sujet n'entend pas les sons faibles par contre il entend les sons forts, si on parle à voix normale, il n'entend pas et demande qu'on élève la voix et dès qu'on le fait il se plaint qu'on crie trop fort.

Le recrutement consiste à :

- une élevation du seuil absolu pour les grandes fréquences
- un abaissement du seuil douloureux
- une diminution du champ auditif tonal et un resserrement des courbes isosoniques d'où :
- un abaissement du seuil différentiel relatif de puissance acoustique : DI devient < 1 dB.

En pratique, on met en évidence le recrutement par les épreuves de Fowler et de L scher.

L'épreuve de Fowler n'est applicable qu'en cas de surdité unilatérale.

On recherche, pour une fréquence donnée, les niveaux supra-limaires d'égalisation de sonie pour les deux oreilles (fig 7).

- Sujet normal : Les mêmes niveaux sonores ont la même sonie pour les deux oreilles.
- Il s'agit d'une surdité gauche, sans recrutement : il faut une puissance acoustique plus grande à gauche qu'à droite pour avoir la même impression d'intensité psychologique ; la courbe est parallèle à la première bissectrice, la différence entre les deux oreilles est la même pour les sons faibles et les sons forts.
- C'est une surdité gauche avec recrutement : aux fortes intensités, les puissances acoustiques d'égalisation sont égales à droite et à gauche.
- On a affaire à une surdité gauche avec sur-recrutement. Un son de 80 dB est entendu par l'oreille gauche aussi fort qu'un son de 100 dB du côté sain.

Bien entendu, l'épreuve de Fowler est effectuée à une fréquence bien déterminée ; elle peut être recommencée pour des fréquences différentes.

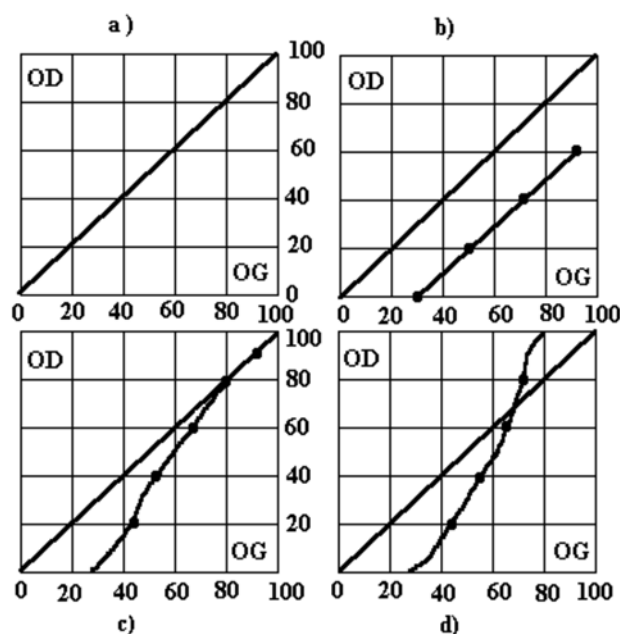
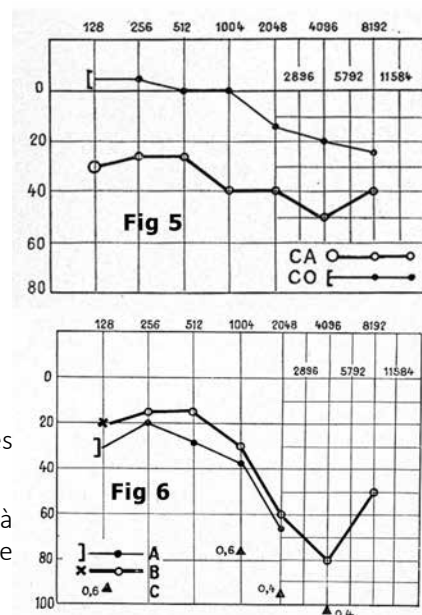


Fig 7 :  preuve de Fowler

L'épreuve de L scher n'est pas une mesure du recrutement, mais une mesure du seuil différentiel d'intensité sonore. Elle est applicable même en cas de surdité bilatérale. On fait entendre un son de 80 dB, dont on fait varier l'amplitude de deux à cinq fois par seconde. Normalement, il faut que cette variation corresponde à une variation de niveau de puissance de 1 dB pour être perçue. Si, par contre, une variation de 0,4 ou même 0,2 dB est perçue, il y a abaissement du seuil différentiel. Un tel abaissement est très suggestif du « recrutement ». On peut recommencer le test pour différentes fréquences.

1.2.3 - AUDIOMÉTRIE VOCALE

Cette méthode étudie la perception par le sujet de mots de sa propre langue, choisis dans le vocabulaire courant, émis à une puissance acoustique déterminée de façon aussi exacte que possible. Cette méthode permet de mesurer au mieux le degré d'invalidité d'un sourd, puisque l'oreille est destinée avant tout à comprendre la parole, et d'évaluer la qualité d'une prothèse.



Épreuve d'intelligibilité : On dispose d'un stock de mots d'une ou deux syllabes et de phrases, préalablement choisis pour leur simplicité, l'absence de confusion possible, et leur représentativité de l'ensemble des phonèmes de la langue.

On demande au sujet de les répéter.

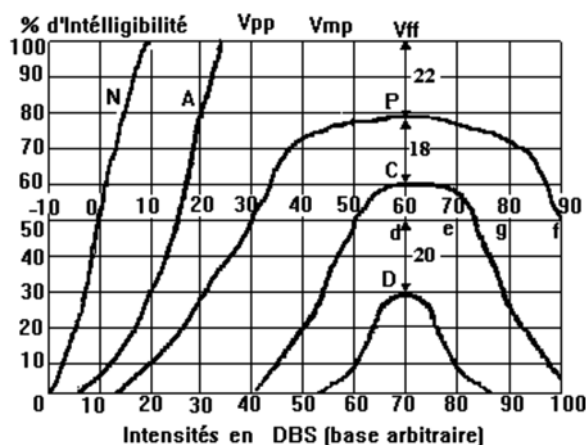
Pour chaque niveau de puissance où ils sont émis, on note le pourcentage de perception (fig 8).

La courbe N est une courbe normale; elle montre que pour un niveau de puissance d'émission de 10 dB, 50p, 100 des mots sont intelligiblement perçus. L'intelligibilité n'est de 100 p. 100 que pour un niveau de 20 dB.

La courbe A, à peu près déduite de la courbe normale par une translation, correspond à une surdité portant aussi bien sur les graves que sur les aigus, comme on en voit dans les atteintes de l'appareil de transmission. On évalue **l'indice d'intelligibilité** correspondant, par la distance qui sépare la courbe pathologique de la courbe normale sur l'axe 50p. 100 (dans le cas de la figure, il vaut 15 dB)

Les courbes B, C, D sont caractéristiques d'une surdité pour les aigus, en général accompagnée de recrutement. Le pourcentage d'intelligibilité ne dépasse pas un maximum, et même il diminue pour les intensités très fortes, ce qui traduit une forte distorsion des sons.

Fig 8 : Épreuve d'intelligibilité



II - EXAMEN OBJECTIF DE L'AUDITION

L'acoumétrie et l'audiométrie demandent la collaboration du sujet à la recherche du type et du degré de surdité. L'examen de l'audition est subjectif et il devient impossible particulièrement pour les nourrissons et les déficients mentaux d'où l'intérêt des méthodes objectives indépendantes de la volonté du sujet.

Les deux méthodes objectives sont l'électrocochléogramme et les potentiels évoqués diffus auditif, leur développement est dû à celui de l'électronique et particulièrement à l'apparition des « moyenneurs » qui permettent d'extraire facilement un signal donné du bruit de fond qui le masque.

II.1 - L'ÉLECTROCOCHLÉOGRAMME

C'est l'enregistrement des potentiels bioélectriques de la cochlée en particulier le potentiel d'action global (P.A) du nerf cochléaire. La stimulation est faite par un son bref (un clic)

Méthode invasive : nécessite l'introduction d'une électrode dans l'OM → FR

II.2 - LES POTENTIELS ÉVOQUÉS DIFFUS AUDITIFS

C'est la mesure de la variation de potentiels enregistrés sur le cuir chevelu à la suite d'une stimulation sonore. L'intérêt est l'enregistrement d'un audiogramme tonal objectif. La méthode est moins précise que l'électrocochléogramme, mais elle est complémentaire et ne nécessite pas d'anesthésie, on peut la pratiquer à tout âge et sans risque.

III - PROTHÈSE AUDITIVE

Une prothèse auditive a pour but de restituer dans les meilleures conditions possible la fonction auditive.

Un appareil de prothèse comprend : un microphone, un amplificateur, une batterie de filtres réglables en bande passante et en atténuation, et finalement un petit écouteur intra-auriculaire (rarement remplacé par un vibreur mastoïdien). En dehors du confort auditif, qui exige une électronique soignée et complexe, des considérations d'encombrement et d'esthétique entrent en jeu, ce qui ne va pas sans quelque contradiction, une miniaturisation très poussée n'étant pas toujours favorable à de hautes qualités électro-acoustiques, spécialement pour le microphone et l'écouteur.

Le résultat dépend beaucoup du type de surdité. Dans les surdités de transmission, où il n'y a pas de distorsion, ni d'amplitude, ni de fréquence, il suffit en principe d'une amplification constante sur toute la gamme des fréquences. Mais ces cas faciles sont d'indication peu fréquente, en raison des progrès de la chirurgie dans la plupart des affections de l'oreille moyenne.

Dans les surdités de perception, le gain doit dépendre non seulement de la fréquence (il doit être plus fort aux fréquences élevées), mais aussi de l'intensité sonore, à cause du recrutement (le gain doit être moins important aux niveaux élevés d'intensité qu'aux niveaux juxta-liminaires). Parmi les différents dispositifs qui permettent à l'amplificateur de se comporter de la sorte citons le réglage automatique du gain qui respecte le rapport signal/bruit, mais qui n'intervient pas de façon instantanée : la prothèse auditive est mal supportée pour les variations brutales d'intensité sonore.

Le résultat dans les surdités de perception est inconstant et sera surtout jugé par des tests d'audiométrie vocale.

Signalons enfin que dans les surdités bilatérales, on tend à pratiquer actuellement des prothèses bilatérales qui permettent de restituer l'orientation auditive.

EVALUATION FORMATIVE

Test 1 :

1) - Rôle de la chaîne des osselets dans l'audition.

2) - Comment fait-on le diagnostic audiométrique de sa destruction ?

En particulier précisez le devenir des conductions aériennes et osseuses pour les fréquences supérieures à 6000 Hz dans ce cas.

Test 2 :

Quelles sont les principales caractéristiques audiométriques (audiométries tonale et vocale) d'un sujet atteint d'une surdité de perception.

Test 3 :

Quelle est la différence entre un audiogramme en dB absolu et un audiogramme en dB de perte ?

Test 4 :

Tracer les audiogrammes en dB de perte sans aucun commentaire et sur le même graphique des cas suivants.

- Surdité de transmission (C.A et C.O)

- Surdité de perception (C.A et C.O)

Test 5 :

Soit un sujet dont les seuils absolus d'audition mesurés en dB absolus sont les suivants en conduction aérienne :

Fréquence : 250	500	1000	2000	4000	8000
Seuil absolu : 70 dB	40 dB	30 dB	20 dB	15 dB	20 dB

Sachant que le sujet normal a un seuil absolu de :

Fréquence : 250	500	1000	2000	4000	8000
Seuil absolu : 20 dB	10 dB	0 dB	-5 dB	0 dB	15 dB

1) - Tracer l'audiogramme de ce sujet en portant en ordonnée les seuils en dB de perte.

2) - Le sujet est-il normal ? Dans le cas contraire, de quel type de surdité est-il atteint ?

Test 6 :

1) - Définition du décibel absolu et du décibel de perte.

2) - Sur un audiogramme tonal quelles sont les différences essentielles qui existent entre un sujet normal et un sujet atteint d'une surdité de perception.

3) - Soit un sujet atteint d'une surdité par transmission ayant entraîné 30 dB de perte à 1.000 Hz.

a - Calculer la puissance acoustique seuil en watts/cm² à cette fréquence de 1.000 Hz.

b - Pouvez-vous donner le niveau de puissance acoustique seuil en dB absolus de ce sujet à 6.000 Hz ? Pourquoi ?

On rappelle que $W_0 = 10^{-16}$ watt/cm².

PCEM2

THÈME XI DEVELOPPEMENT COGNITIF

LE DEVELOPPEMENT COGNITIF

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. Définir les termes : adaptation, assimilation, accommodation, schème d'action
2. Connaître les principaux stades du développement de l'intelligence chez Piaget
3. Définir les notions de permanence de l'objet et de fonction symbolique
4. Citer les autres théories concernant le développement cognitif chez l'enfant

1-INTRODUCTION

Le développement cognitif compte parmi les domaines les plus dynamiques de la psychologie. Ce domaine de recherche a fait l'objet de nombreuses théories au cours des dernières décennies, la plus connue étant sans doute celle de Jean Piaget, théorie qui a contribué de façon significative à la révolution des sciences cognitives à la fin des années soixante du siècle dernier. L'accumulation des connaissances au cours des cinquante dernières années a permis de découvrir que le développement cognitif ne correspond pas à une simple progression linéaire vers des habiletés plus complexes en fonction de l'âge. De fait, l'avancement de la science dans ce domaine mène à un constat étonnant : l'activité cognitive du bébé et du très jeune enfant est beaucoup plus sophistiquée que les travaux de Piaget ne le laissaient croire.

2-DÉFINITIONS

La cognition peut être définie comme l'ensemble des processus nous permettant d'acquérir des connaissances sur notre environnement : savoir, mémoriser, raisonner et résoudre afin de le contrôler et le manipuler. Elle renvoie à l'ensemble des activités mentales associées à la pensée, au savoir, au souvenir et à la communication. Son développement reste étroitement lié au développement affectif et sensori-moteur. C'est ainsi que l'activité motrice et sensorielle de l'enfant est subordonnée aux partenaires de la relation, à la source de stimulation et d'échange affectifs et aux modèles d'imitation et d'identification qu'elles représentent.

Intelligence humaine est comprise comme un moyen d'adaptation de l'individu au milieu qui lui permet de préserver ses meilleures chances de survie.

Cette adaptation utilise 2 mécanismes : Assimilation et Accommodation.

- **L'Assimilation** : L'assimilation consiste à intégrer, incorporer des éléments nouveaux, extérieurs aux structures du sujet.

Par exemple : La neige provoque une sensation de froid

- **L'Accommodation** : la conséquence de l'action du milieu sur l'organisme.

Transformation des structures propres du sujet en fonction du milieu extérieur.

Par exemple : Lorsqu'il neige, on se couvre davantage

Toute activité spontanée consiste à assimiler d'abord et à accommoder ensuite. Un équilibre entre l'assimilation du milieu par le sujet et l'accommodation de ce dernier au milieu s'établit. La relation d'adaptation du sujet au milieu est une incessante activité d'équilibration.

De même Piaget situe dans les premiers stades de l'intelligence la notion de **schème ou schème d'action**. Un schème est ce qui dans une action est généralisable, transposable d'une situation à une autre ; en d'autres termes les schèmes sont un ensemble organisé de mouvements (sucrer, tirer, pousser...) ou d'opérations (sérieux, classer, mesurer...) dont l'enfant dispose (dans le premier cas), ou qu'il acquiert et développe par son interaction avec le monde environnant.

3-LES CARACTÉRISTIQUES DU DÉVELOPPEMENT COGNITIF

Le développement est considéré comme résultat de l'interaction entre des facteurs biologiques et environnementaux en d'autres termes de l'interaction entre l'inné et l'acquis : l'individu bénéficie plus ou moins de son environnement en fonction de ses potentialités biologiques, et le même potentiel ne s'exprime pas de la même façon selon les conditions du

Ce poly a été téléchargé depuis <http://med-tmss.blogspot.com/2016/08/cours.html>

milieu. Ce développement requiert, tout comme la maturation cérébrale, des signaux de l'environnement : expériences sensorielles et motrices et des interactions sociales qui leur donnent du sens.

Le développement et l'intégration des fonctions cognitives naissent donc de l'enrichissement de la structure de base de l'enfant grâce à des expériences successives et répétées. Son développement se fait selon une chronologie propre à chaque fonction et de façon plus ou moins identique pour tous.

4-LE MODÈLE PIAGETIEN

Jean Piaget est un psychologue, biologiste et épistémologue suisse connu pour ses travaux en psychologie du développement. Il a tenté de modéliser le développement de l'intelligence sur la base de principes logiques à partir des observations directes et d'études longitudinales. Pour lui, l'évolution de l'intelligence serait le fruit des diverses stratégies que l'enfant utilise pour résoudre un problème ou une situation nouvelle.

Piaget divise le développement psychologique de l'enfant en plusieurs stades, chacun lui-même divisé en sous-stades, conditionnant le suivant. Les différents moments du développement sont :

- Le stade de l'intelligence sensori-motrice (de la naissance à 2 ans)
- Le stade de l'intelligence pré opératoire (de 2 à 6 ans)
- Le stade des opérations concrètes ou de l'intelligence opératoire (de 6 à 12 ans)
- Le stade des opérations formelles (de 12 à 16 ans)

4.1 PÉRIODE SENSORI-MOTRICE : DE 0 A 24 MOIS

Au cours de cette période, la construction de l'intelligence s'appuie sur les perceptions et les mouvements. Elle est fondée sur l'utilisation de schèmes sensori-moteurs qui font entrer le bébé en communication avec le monde extérieur.

La période sensori-motrice est divisée en 6 stades marqués par une décentration progressive du bébé par rapport à lui-même.

- **1^{er} stade (de 0 à 1 mois)** : L'enfant développe l'exercice des réflexes. L'enfant n'a aucune réaction suite à la disparition d'un objet. Les réflexes archaïques sont nombreux nous citons le réflexe de Moro, le réflexe de redressement et de marche automatique, le grasping (la main du bébé se referme quand un doigt vient toucher la paume), le foussement, la succion, la déglutition, le réflexe des points cardinaux...

Certains de ces réflexes vont être pratiqués, exercés et se renforcer : déglutition, succion. Les réflexes fonctionnent dès la naissance, mais ont toujours besoin d'exercice pour s'adapter à la réalité extérieure. Au fur et à mesure de l'exercice, les réflexes vont évoluer, se perfectionner et donner lieu à la constitution de schèmes. D'autres vont disparaître : Moro, marche automatique... (réflexes archaïques)

- **2^e stade (de 1 à 4 mois)** : Les premières adaptations acquises et les réactions circulaires primaires, l'enfant est centré sur son corps. Les réactions réflexes se répètent, mais assimilent de nouveaux stimuli qui sont le point de départ de nouvelles conduites intéressant uniquement le corps lui-même (poursuite oculaire, prémices de préhension, acquisitions d'habitudes sensori-motrices, succion du pouce). L'enfant a une réaction émotionnelle (pleurs, cris, etc.) à la disparition de l'objet, mais n'entreprind aucune recherche.
- **3^e stade (de 4 à 8 mois)** : c'est le stade des répétitions intentionnelles des découvertes fortuites. Les réactions circulaires secondaires et les procédés destinés à faire durer les spectacles intéressants se multiplient. Ce stade apparaît au moment de la coordination oculo-manuelle et il y a un passage d'une centration sur le corps à une centration sur les choses

Exemple 1 : le bébé découvre qu'en tirant sur une ficelle qui pend du toit de son berceau, les objets qui y sont fixés remuent : il tire systématiquement dessus.

Exemple 2 : quand la main et un objet désiré sont simultanément dans le champ visuel, le bébé saisit l'objet : ex il voit sa main et un hochet : il saisit le hochet.

Il acquiert la permanence pratique, il revient au jouet qu'il a laissé. Par contre si on pose un linge dessus il ne le cherche pas sauf si c'est lui qui l'a mis dessous (ou s'il voit une partie de l'objet, qui fait sens pour lui, dépasser).

- **4^e stade (de 8 à 12 mois)** : Coordination intentionnelle des réactions circulaires secondaires et leur application aux situations nouvelles. Il s'agit de l'utilisation d'un moyen déjà connu pour un but nouveau. L'enfant recherche systématiquement l'objet. Cependant sa représentation de l'objet n'est pas encore parfaite.
- **5^e stade (de 12 à 18 mois)** : La recherche active de moyens nouveaux, par tâtonnement. C'est le stade des expérimentations actives et de recherche de la nouveauté sous forme de réactions circulaires tertiaires. L'enfant fait des expériences pour voir : l'enfant se lance à la conquête du milieu extérieur.

3 conduites caractéristiques de cette époque :

- **conduite du support** : l'enfant découvre qu'il peut attraper un objet éloigné en tirant sur la couverture sur lequel il est placé.
 - **conduite de la ficelle** : un objet attirant pour l'enfant est placé à distance dans le champ
 - **conduite du bâton** : la ficelle est un prolongement de l'objet différent du bâton qui est un instrument.
Ex : faire glisser un objet (une peluche, une poupée) au moyen d'un bâton pour le rapprocher et le saisir.
- **6^e stade (de 18 mois à 24 mois)** : L'invention des moyens nouveaux par combinaison mentale des schèmes. L'enfant est capable de retrouver l'objet même si les déplacements sont invisibles.

LA PERMANENCE DE L'OBJET

La permanence de l'objet est la connaissance par l'enfant que les objets qui l'entourent existent à l'extérieur de lui, mais aussi et surtout, qu'ils continuent d'exister, même s'il ne les perçoit pas via l'un de ses cinq sens.

Cette acquisition passe par 3 phases :

a. Phase adualistique :

L'enfant ne s'intéresse à un objet qu'en fonction de son désir immédiat. En l'absence de désir l'objet n'existe plus pour lui.

b. Phase de permanence partielle de l'objet :

À partir de la coordination oculo-manuelle (5e mois), l'enfant recherche l'objet dans les limites de son champ perceptif. (Si on cache l'objet derrière un écran, l'enfant arrête sa recherche).

c. Phase de permanence de l'objet proprement dite :

Elle passe elle-même par plusieurs étapes, débute vers 9 mois, s'achève vers 18 mois avec l'acquisition du « groupement des déplacements » (visibles et invisibles des objets) basée sur les caractéristiques temporo-spatiales des mouvements des objets.

4.2 PÉRIODE PRÉOPÉRATOIRE (DE 2 ANS À 7 ANS)

L'intelligence cesse d'être purement sensori-motrice : elle s'intériorise, se détache de la perception immédiate, grâce à la représentation mentale qui donne accès à la fonction symbolique que Piaget appelle la **fonction sémiotique**. Jusque là, l'enfant utilisait des indices, pas des symboles ni des signes.

La fonction symbolique, c'est la capacité d'évoquer un objet ou une situation non perçus actuellement en se servant de symboles ou de signes. La fonction symbolique est donc la possibilité de représenter quelque chose (un signifié) par un symbole ou par un signe (un signifiant) qui ne sert qu'à cette représentation.

L'enfant peut désormais se représenter un objet absent (il peut prendre un bâton pour simuler un avion ou dans l'instant qui suit une voiture). Cette nouvelle fonction inaugure une nouvelle étape de la croissance mentale : l'intelligence par la représentation et la pensée, et plus seulement par l'action. Cinq conduites marquent son acquisition : l'imitation différée, les jeux de faire semblant, le langage, l'imagerie mentale, le dessin, formes non présentes dans la période précédente.

L'imitation joue un rôle important dans le développement de cette représentation symbolique. En effet l'enfant imite les faits, gestes et paroles de son environnement puis il intériorise cette imitation qui devient une image mentale, une représentation symbolique.

La multiplication des expériences d'imitation fournit à la pensée un champ d'application illimité qui lui permettra progressivement de résoudre des problèmes de plus en plus compliqués.

Ce stade est marqué par l'égoïsme qui est l'incapacité qu'a l'enfant de se décentrer et de coordonner son point de vue avec celui d'autrui. Il se marque par **l'artificialisme, la causalité morale, le finalisme**. À partir de 3-4 ans, la pensée de l'enfant revêt d'autres caractéristiques comme l'animisme (les choses sont vivantes et douées d'intention : le soleil qui se cache au crépuscule s'en va dormir dans son lit), la pensée finaliste (l'enfant pense qu'il existe une cause à toute chose, c'est la période des pourquoi incessants) et l'artificialisme (l'enfant pense que les choses du monde sont fabriquées comme l'est l'être humain : les montagnes sont construites grâce à l'amoncellement de cailloux). Par ailleurs, l'enfant ne peut pas toujours généraliser ses points de vue : s'il voit le soleil à deux endroits différents au cours de la journée, il pensera qu'il y a deux soleils.

À ce stade l'enfant est capable de nommer deux couleurs (d'abord le rouge puis le jaune), d'intégrer les notions d'espace : haut/bas et de grandeur grand/petit, connaît la signification de certaines sensations telle que froid, faim, fatigue, fâché.

À ce stade la pensée n'est pas encore réversible. Elle est intuitive et le raisonnement est « prélogique » : l'enfant est capable d'un raisonnement logique sur une partie seulement des données, sur un seul aspect des choses.

4.3 PÉRIODE OPÉRATOIRE OU STADE DES OPÉRATIONS CONCRÈTES

De 7 ans à 12 ans. L'enfant acquiert le raisonnement logique d'abord concret, puis abstrait.

À partir de 7 ans, les actions de l'enfant deviennent des opérations, c'est-à-dire des **actions exécutables en pensée et réversibles**. L'enfant ne peut pas raisonner à partir des seuls énoncés verbaux. On distingue :

- les structurations à caractère infra logique : conservations physiques (quantité de matière, de poids, de volume) et conservations spatiales (des longueurs, des surfaces, des volumes spatiaux)
- les structurations logicomathématiques

Vers 7 ans, l'enfant acquiert la réversibilité logique : qui donne plus de mobilité à sa pensée.

La réversibilité logique c'est le fait qu'une transformation dans le monde physique peut être annulée en pensée par une action orientée en sens inverse.

Ex. une boule de pâte à modeler transformée en galette

La pensée opératoire concrète est structurée et logique. Elle utilise la réversibilité et la déduction. L'enfant est capable de distinguer à travers le changement ce qui est invariant.

Cette pensée logique ne s'applique qu'à des opérations concrètes.

Ce stade est marqué par l'acquisition de certaines notions :

a. Les conservations physiques :

- Conservation de la quantité de la matière (7-8 ans) : Un morceau de pâte à modeler contient la même quantité de pâte qu'il soit présenté en boule ou en galette.
- Conservation de la quantité de poids (8-9 ans) : Un kilo de plume est aussi lourd qu'il soit présenté dans un sac ou dans plusieurs.
- Conservation de la quantité de volume (11-12 ans) : Le volume d'un litre d'eau reste inchangé, qu'on le présente dans une bouteille, ou dans un récipient plus évasé.

b. Les conservations spatiales :

- Conservation des quantités numériques (7 ans) : Quand on place une rangée de jetons peu espacés et qu'on demande à l'enfant de prendre autant de jetons que l'exemple, il réalisera correctement l'exercice.
- Classification (8 ans) : Acquisition des notions de « tous », de « quelques », vers l'âge de 8 ans
- Sériation (8 ans)
- Groupements multiplicatifs : C'est la capacité à combiner la classification et la sériation.

4.4 STADE DES OPÉRATIONS FORMELLES :

À partir de 12 ans. L'enfant commence à pouvoir détacher son raisonnement des opérations concrètes pour l'appliquer sur des énoncés verbaux, pour faire de pures hypothèses.

C'est **le raisonnement « hypothético-déductif »** : ce n'est plus un raisonnement sur des objets, mais un raisonnement sur les opérations qu'on peut appliquer aux objets.

Peu à peu, l'enfant devenant adolescent peut raisonner sur des énoncés verbaux de plus en plus abstraits, et faire des hypothèses de plus en plus complexes. L'adolescent peut, à partir d'expériences personnelles, aboutir à une conclusion.

Ce stade, où toutes les opérations de la pensée sont possibles, signale l'instauration de la pensée de type adulte.

5-THÉORIES ACTUELLES DU DÉVELOPPEMENT DE L'INTELLIGENCE

5.1 MODÈLE BIOLOGIQUE MATURATIONNISTE : (GESELL, MONTESSORI)

Déploiement de ce qui est préformé dans l'organisme. Le milieu nourrit une croissance préformée.

5.2 MODÈLE (ÉPIGÉNÉTIQUE) BEHAVIORISTE : (DE BEHAVIOR : COMPORTEMENT)

Le développement, c'est le façonnage de l'organisme par l'environnement à travers le conditionnement agissant sur plaisir/déplaisir (la carotte et le bâton)

5.3 MODÈLE INTERACTIONNISTE SOCIAL : (VYGOTSKY)

Le développement est le produit des actions réciproques de l'organisme et de l'environnement, qui apporte avec le langage des problèmes (à résoudre) et des procédures cognitives. Il développe deux concepts importants :

A- NOTION DE ZONE PROXIMALE DE DÉVELOPPEMENT.

Elle est définie par la distance entre les tâches que l'enfant est capable de réaliser seul (niveau actuel de développement) et celles qu'il est capable de réaliser sous la direction d'un autre (qui guide en posant des questions, donnant des exemples...). Un enfant peut toujours faire plus que ce qu'il sait faire seul, pourvu qu'il soit aidé.

B- DIMENSION SOCIALE DU DÉVELOPPEMENT

L'interaction sociale détermine les apprentissages scolaires, mais aussi le développement de toutes les fonctions psychiques supérieures : prise de conscience, langage, attention et mémoire volontaire.

« Chaque fonction psychique supérieure apparaît deux fois au cours du développement :

- d'abord comme activité collective, sociale donc comme fonction interpsychique
- Puis la 2^e fois comme activité individuelle, intérieure, comme fonction intrapsychique ».

Le travail dans la zone proximale de développement – apprendre avec de l'aide- est utilisé à l'école tous les jours.

5.4 LES NÉO-PIAGÉTIENS

Les modèles dits néo-piagétien introduisent la notion de conflit sociocognitif. Les interactions sociales (présence d'autrui) sont importantes dans l'apprentissage. Ces modèles se basent sur l'intégration de différents courants théoriques (théorie de l'apprentissage, du traitement de l'information) dans la théorie piagétienne. Ils se sont développés en réponse à un certain nombre de critiques adressées à la théorie piagétienne, relative notamment à la variabilité situationnelle observée, et à la variabilité inter- et intra-individuelle ce qui donne lieu à des cheminements différents dans la construction de la connaissance. Ce modèle admet que dans beaucoup de situations le sujet dispose de plusieurs modes de traitement pour résoudre un même problème.

6-CONCLUSION

L'étude des processus cognitifs chez l'enfant est étroitement liée à ses capacités motrices et sensorielles d'une part, mais aussi aux facteurs d'environnement d'autre part.

Ce pourquoi, l'un des domaines les plus récents de la recherche, est celui des compétences du nouveau-né et son corollaire, les interactions précoces.

L'étude de la genèse de la pensée et du psychisme laisse même certains auteurs poser la question d'un apprentissage in utero.

BIBLIOGRAPHIE

- 1- Psychologie du développement. Helen Bee, Denise Boyd. De Boeck Edition : 2e édition, 2003.
- 2- Intelligences et développement de l'enfant : variations, évolution, modalités. Robert S Siegler. De Boeck Edition, 2000.
- 3- Enfant et raisonnement : le développement cognitif de l'enfant. Robert S Siegler. De Boeck Edition : 3e édition, 2010.
- 4- Le développement psychologique de l'enfant. Roger Deldime, Sonia Vermeulen. De BoeckEdition : 7e édition, 2004.

LE LANGAGE

Les objectifs éducationnels

Au terme de ce cours, l'étudiant pourra :

1. Reconnaître les conditions nécessaires à l'acquisition du langage
2. Décrire les principales étapes d'acquisition du langage

1-INTRODUCTION

Le langage est une fonction d'expression et de communication entre les sujets mise en œuvre au moyen d'un système de signes vocaux et éventuellement de signes graphiques (l'écriture).

Le développement du langage nécessite deux conditions :

1.1 UN CIRCUIT NEUROPHYSIOLOGIQUE PARVENU À MATURITÉ :

- Un appareil de perception : l'appareil auditif. Son intégrité est une condition nécessaire dans l'apprentissage du langage. Une surdité et même une simple hypoacousie peuvent altérer l'acquisition du langage.
- Un appareil effecteur : l'appareil phonatoire, constitué par la cavité buccale, la langue, les lèvres, le larynx et les cordes vocales. Son intégrité est nécessaire pour une bonne acquisition du langage. Certaines malformations comme le frein de la langue ou le bec de lièvre peuvent engendrer des troubles dans l'articulation du langage.
- Le système nerveux central : les centres du langage, qui ont pour fonction de décoder le message auditif, de le stocker en mémoire et de le transmettre à l'appareil effecteur.

1.2 DES FACTEURS PSYCHOLOGIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX :

L'acquisition du langage est indissociable du développement psychologique de l'enfant. Ainsi, le climat affectif et la qualité des échanges entre l'enfant et son environnement précoce jouent un rôle important dans l'accès au langage, et en particulier la qualité des interactions entre le bébé et les partenaires adultes. Ces échanges et cet environnement constituent le « bain de langage » dans lequel évolue l'enfant dès la première année de vie, indispensable au bon développement du langage. Des carences affectives précoces mais aussi les troubles du développement de la personnalité de l'enfant peuvent se traduire par des troubles du langage de gravité variable.

2-LES ÉTAPES D'ACQUISITION DU LANGAGE

2.1 LE PRÉLANGAGE

Cette étape s'étend de la naissance à la fin de la première année. Les émissions sonores produites à ce stade permettent de préparer et de mettre en place les systèmes nécessaires à la réalisation du langage.

A- LES CRIS DU BÉBÉ

Par les cris et les pleurs, le bébé dès la naissance exprime un état de malaise interne (lié à la faim, l'inconfort ou le déplaisir) et sont perçus par la mère comme un signe d'appel.

B- LE BABIL

C'est vers le 3^e mois et à mesure que le bébé acquiert une meilleure coordination de sa respiration qu'apparaît le babil, encore appelé gazouillis ou lallation. Le babil est fait d'un répertoire de sons très variés grâce auquel le bébé va s'exercer à maîtriser activement ses organes de phonation. La richesse des sons produits est telle que pour certains auteurs, l'enfant est capable de reproduire une somme de sons qu'on ne retrouve jamais réunis dans une même langue. Le babil n'apparaît qu'aux moments de bien-être et de quiétude, il prend progressivement un caractère ludique. Les adultes sont généralement très attentifs à ces premières manifestations phoniques qu'ils stimulent et encouragent.

2.2 LE PETIT LANGAGE

A- LES PREMIERS MOTS

C'est vers la fin de la 1^{re} année qu'on observe l'émission des premiers mots. Il s'agit au début d'un assemblage fortuit de syllabes identiques (mama, papa). Le rôle de l'adulte dans cette nouvelle acquisition est encore fondamental, il répète avec joie et admiration les premiers mots émis que l'enfant reprend à son tour. Une situation d'échange écholalique se crée alors entre le bébé et l'adulte qui ne fait que renforcer les nouveaux acquis de l'enfant. Ultérieurement, les acquisitions dans ce domaine s'accroissent : à 12 mois, l'enfant peut avoir acquis 5 à 10 mots, à 2 ans le vocabulaire peut atteindre 200 mots. Dans tous les cas, la compréhension passive précède l'expression active.

B- LE MOT-PHRASE

Après avoir acquis un capital de mots suffisant, l'enfant va utiliser ces derniers non seulement pour désigner un objet ou une personne, mais aussi pour exprimer une intention. C'est l'étape du mot-phrase, le mot ainsi employé va désigner une signification beaucoup plus large qu'il ne l'a isolément. Ce type de langage s'accompagne d'un contexte gestuel pour souligner l'intention exprimée.

C- LES PREMIÈRES PHRASES

Vers 18 mois, l'enfant est capable de rassembler en un seul énoncé une formule de 2 ou 3 mots. Ces phrases encore rudimentaires, puisque dépourvues de règles grammaticales, ont très souvent un style télégraphique. À partir de 2 ans, une certaine construction grammaticale s'ébauche. L'enfant emploie des verbes d'action, puis des adjectifs adaptés, des pluriels courants, ses phrases deviennent ainsi plus élaborées.

2.3 LE LANGAGE PROPREMENT DIT

Il se met en place vers 3 ans et nécessite un abandon progressif des formules grammaticales simples et du vocabulaire spécifique de l'étape précédente. Le langage devient peu à peu un moyen de connaissance et un reflet des nouvelles capacités d'abstraction de l'enfant. L'introduction du « je » est une des premières étapes et constitue un repère dans de l'accession au langage proprement dit.

À 3 ans, l'enfant sait dire son nom, peut utiliser quelques mots abstraits (grandeur, différence). Il est capable de construire des phrases interrogatives : « où ? », « quand ? », « pourquoi ? », de plus en plus l'enfant est dans une quête de savoir. Le « comment ? » intervient plus tard vers 4 ans. Entre 4 et 6 ans, âge habituel de la préscolarisation, l'enfant a acquis l'essentiel de la structure de la phrase et du bagage linguistique. À 5-6 ans, il est prêt pour l'apprentissage du langage écrit.