

PHYSIOLOGIE DU CERVELET

I/ INTRODUCTION :

Le cervelet, amarrée à la face postérieure du tronc cérébral, est appelé petit cerveau, car constitué comme le cerveau d'un cortex, de substance blanche où sont localisés des noyaux.

Les atteintes ou l'ablation du cervelet n'entraînent pas de paralysie mais altère considérablement la fonction motrice.

Le cervelet maintient l'équilibre, régule le tonus musculaire, coordonne le mouvement volontaire et il a un rôle dans la programmation motrice.

Les signaux d'entrée qui arrivent au cervelet par les afférences sont modifiés par les traitements qui se font dans le cervelet et sont ensuite renvoyés aux neurones moteurs supra-segmentaires corticaux (après relais dans le thalamus) et du tronc cérébral.

Le cervelet coordonne le mouvement volontaire, car il a la capacité de réduire ou de corriger la différence entre le mouvement prévu et le mouvement réalisé.

Le cervelet **détecte l'erreur motrice et la corrige**.

Ces corrections de l'erreur motrice se font :

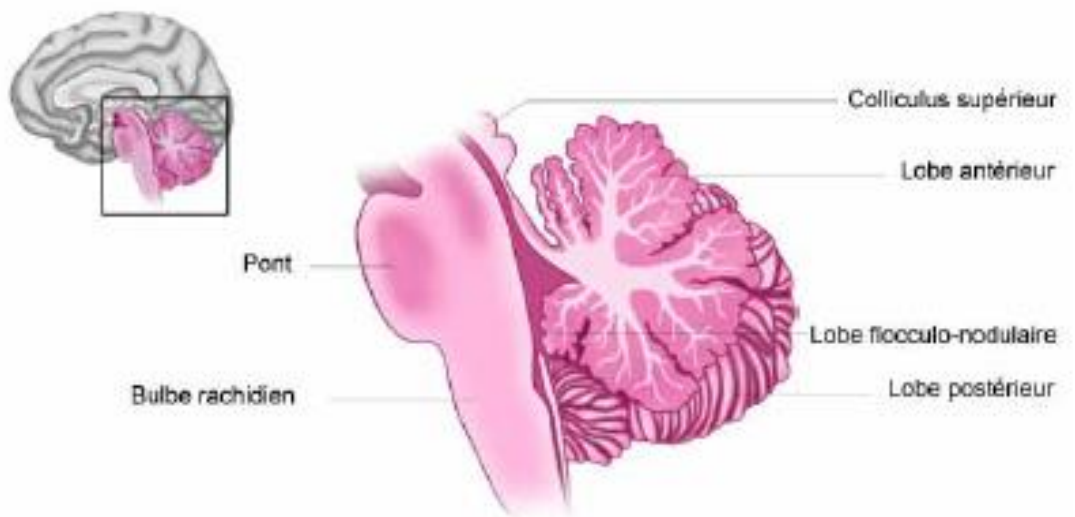
- Au cours du mouvement (c-à-d en temps réel), par des rétroactions tactiles, proprioceptives et visuelles sur le cervelet (enfiler une aiguille),
- Par apprentissage moteur (mémorisation de l'acte moteur à partir d'expériences antérieures) comme pour les mouvements balistiques, trop rapides (écraser un moustique).

L'atteinte du cervelet ou de ses voies se traduit par des erreurs motrices persistantes dont la nature du trouble moteur dépend du siège de la lésion.

II/ ORGANISATION ANATOMO-FONCTIONNELLE DU CERVELET :

II-A- ASPECT MACROSCOPIQUE :

Le cervelet est situé à la face postérieure du tronc cérébral. Il lui est reliée par trois paquets de fibres : les pédoncules cérébelleux inférieurs, moyens et supérieurs.



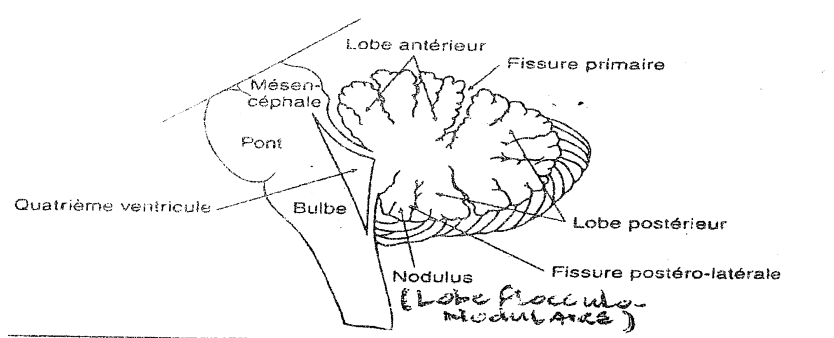
■ COUPE SAGITTALE DU CERVELET

©(y)BRAIN 2011

Le cervelet est formé d'une partie axiale (le vermis) et de deux expansions latérales (les hémisphères cérébelleux).

Chaque hémisphère est subdivisé en zone intermédiaire (paravermienne) et zone latérale.

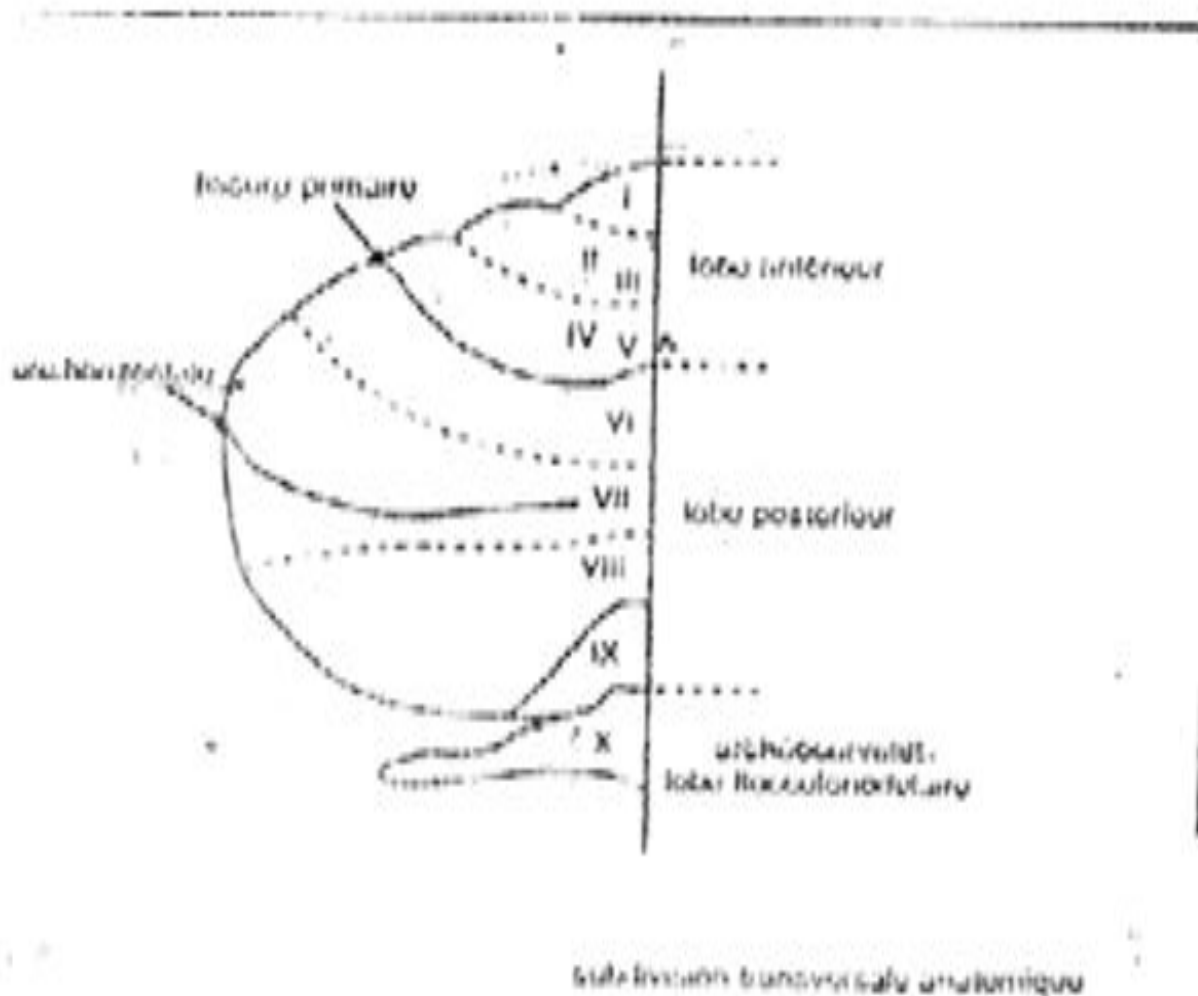
Les fissures primaire et postéro-latérale divisent respectivement le cervelet en : lobe antérieur, postérieur et flocculo-nodulaire.



Coupe médio-sagittale du cervelet

Chaque lobe se subdivisent transversalement en lobules, numérotés de I- IX, cinq dans le lobe antérieur et quatre dans le lobe postérieur.

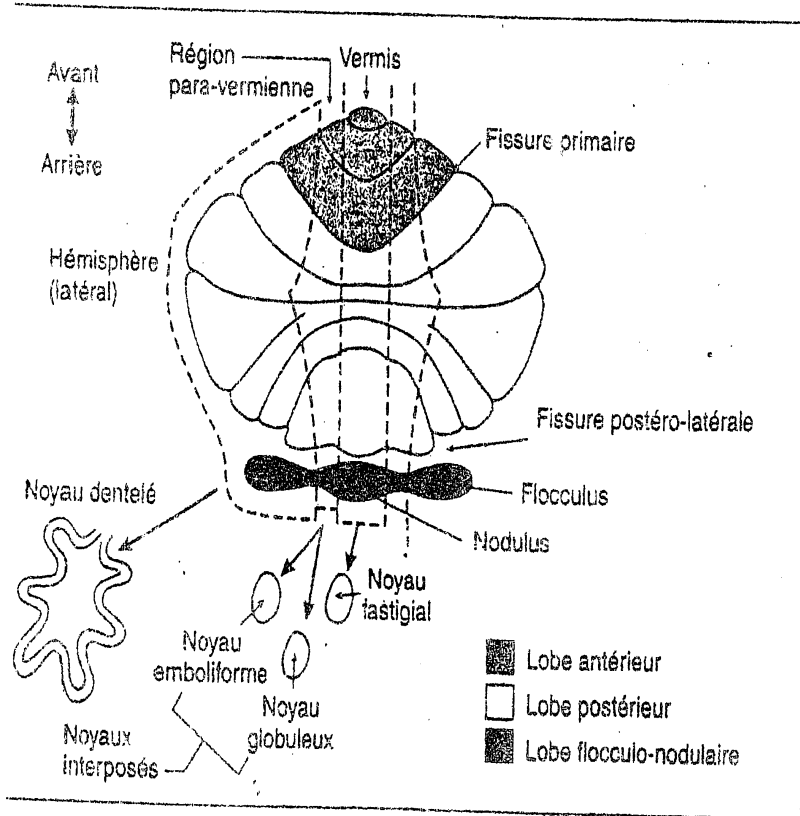
Le lobe flocculo-nodulaire correspond au lobule X.



Le cortex cérébelleux recouvre le vermis, les régions intermédiaires et latérales des deux hémisphères.

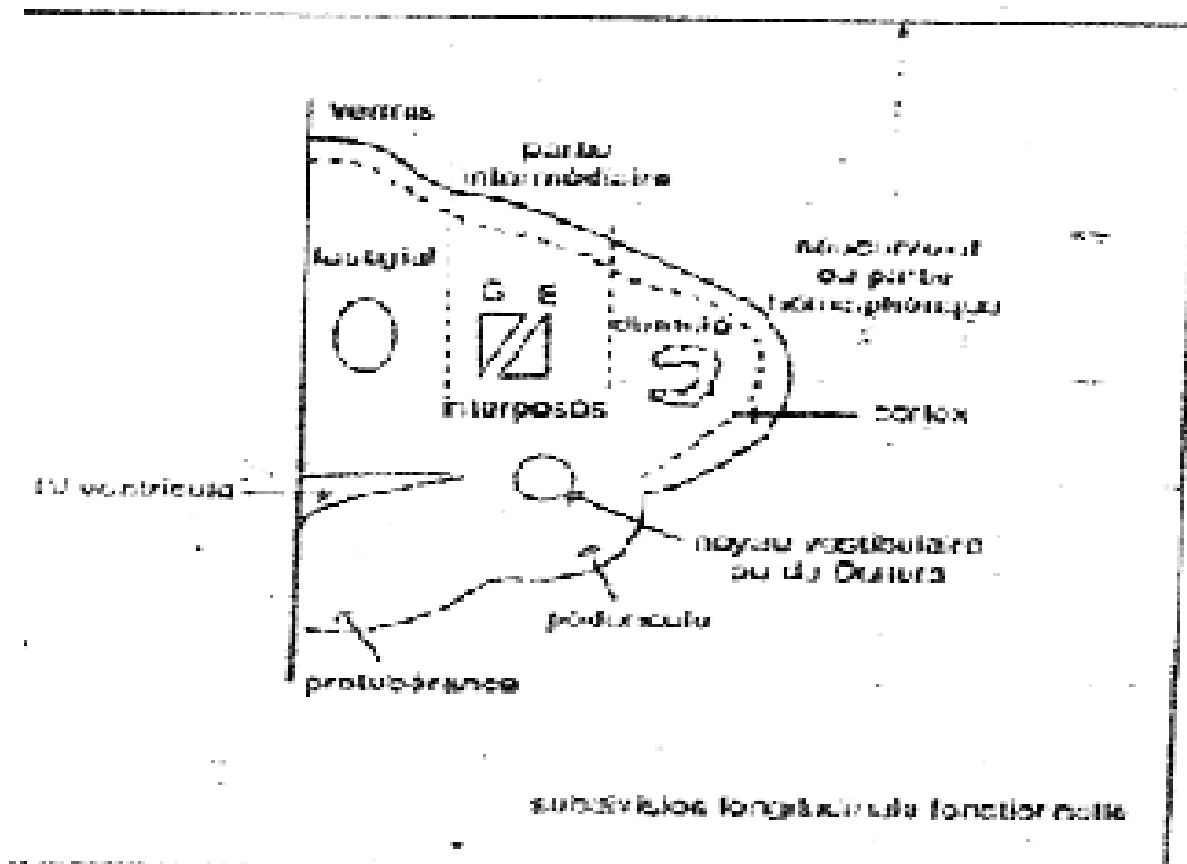
A chacune de ces zones correspond un noyau spécifique cérébelleux profond (noyau cérébelleux sous-cortical) :

- Le noyau fastigial (du toit) pour le vermis
- Les noyaux globuleux et emboliforme pour la partie intermédiaire
- Le noyau dentelé (olive cérébelleuse) pour la partie hémisphérique.
- Le noyau vestibulaire de Deiters du tronc cérébral est considéré comme un noyau cérébelleux car il reçoit des afférences directes du lobe flocculo-nodulaire.



Régions sagittales du cervelet

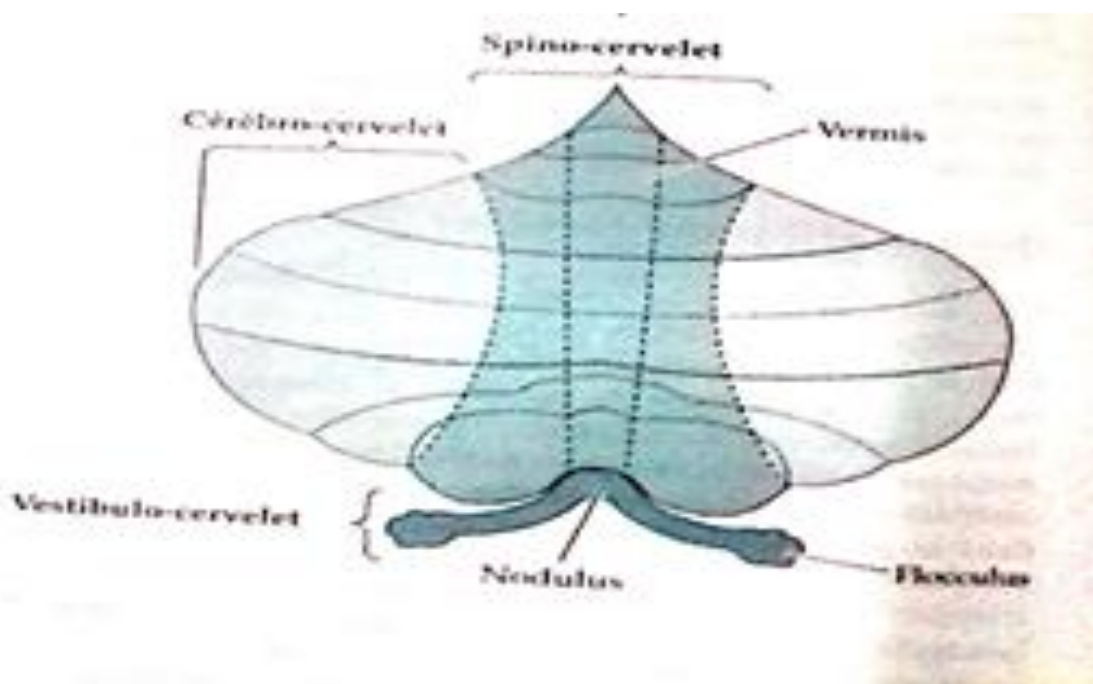
Le cervelet est constitué de zones orientées sagittalement, qui maintiennent des relations topographiques avec les trois séries de noyaux cérébelleux profonds sous-jacents. Les cellules de Purkinje de la région vermienne se projettent sur les noyaux fastigiux, alors que celles des régions para-vermiennes plus latérales, se projettent sur les noyaux emboliforme et globuleux. Les cellules de Purkinje des hémisphères cérébelleux se projettent sur les noyaux dentelés.



II-B- ASPECT FONCTIONNEL :

Fonctionnellement les parties du cervelet sont nommées selon l'origine des afférences qu'elles reçoivent :

- **Le cérébro-cervelet** : (néo-cervelet) : il est le plus volumineux, il occupe la majeure partie latérale de chaque hémisphère cérébelleux.
Ses afférences proviennent de nombreuses aires du cortex cérébral.
Il intervient dans la régulation des mouvements précis, notamment dans la planification et l'exécution des actes moteurs complexes spatialement et temporellement (comme la parole).
- **Le spino-cérébelleux** (paléo-cervelet) : il occupe la zone médiane et paramédiane des hémisphères cérébelleux.
Ses afférences proviennent directement de la moelle épinière.
La partie paramédiane (para-vermienne) du spino-cervelet intervient principalement dans les mouvements des muscles distaux.
La partie médiane du spino-cervelet (le vermis) intervient dans la motricité des muscles proximaux et régule les mouvements oculaires.
- **Le vestibulo-cervelet** : phylogénétiquement le plus ancien (archéo-cervelet) :
Il est formé des lobes inféro-caudaux du cervelet et comprend le flocculus et le nodulus (lobe flocculo-nodulaire).
Ses afférences proviennent des noyaux vestibulaires du tronc cérébral.
Il intervient dans la régulation des mouvements de la posture, de l'équilibration et des réflexes vestibulo-oculaires.



Les connexions entre le cervelet et les autres parties du système nerveux se font à travers trois faisceaux massifs "les pédoncules cérébelleux" :

- **Le pédoncule cérébelleux supérieur** : (brachium conjonctivum) :

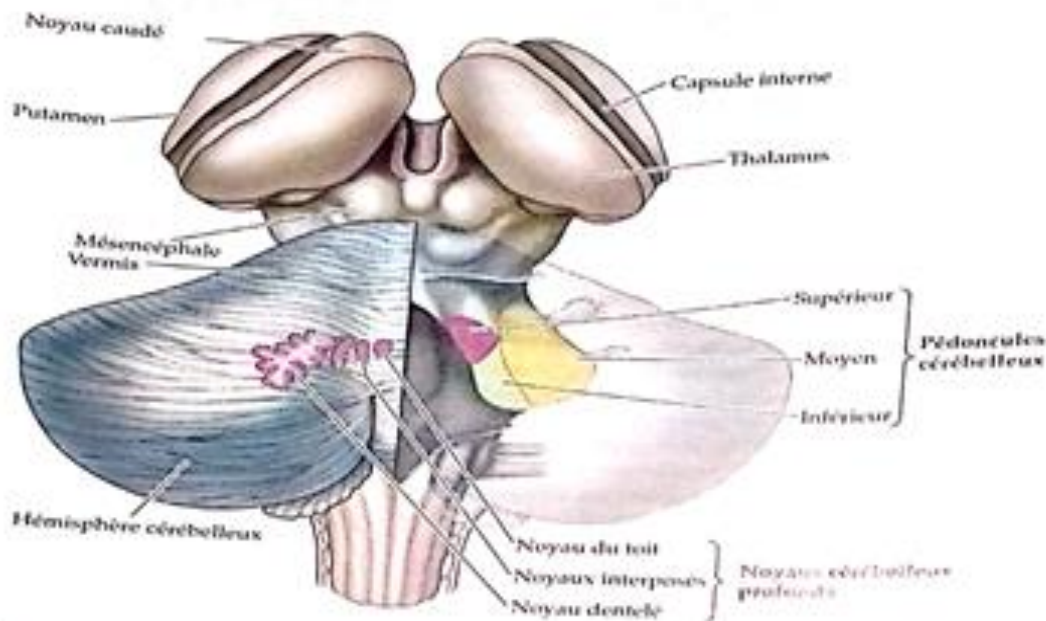
Est une voie efférente.

- **Le pédoncule cérébelleux moyen** : (brachium pontis) :

Est une voie afférente.

- **Le pédoncule cérébelleux inférieur** : (corps restiforme) :

Il contient des voies afférentes et efférentes.



II-B-1- Les afférences cérébelleuses :

Les afférences qui arrivent vers le cervelet se projette à la fois sur les noyaux profonds et sur le cortex cérébelleux :

Le cortex cérébral est la source la plus abondante d'afférences cérébelleuses qui projettent sur le cérébro-cervelet.

Ces afférences proviennent :

- Du cortex moteur primaire,
- Des aires prémotrices du lobe frontal
- Des cortex somesthésiques primaire et secondaire du lobe pariétal antérieur
- Des aires visuelles secondaires du lobe pariétal postérieur (elles proviennent essentiellement des aires associatives traitant les stimuli visuels mobiles et la

perception visuo-spatiale) ; ce qui permet au cérébro-cervelet la coordination des mouvements sous contrôle visuel.

Ces afférences corticales font synapses avec des neurones des noyaux du pont du même côté du tronc cérébral ; ces derniers donnent naissance aux fibres pontiques transverses qui franchissent la ligne médiane et forment le pédoncule cérébelleux moyen ; relayant ainsi les signaux corticaux vers l'hémisphère cérébelleux controlatéral.

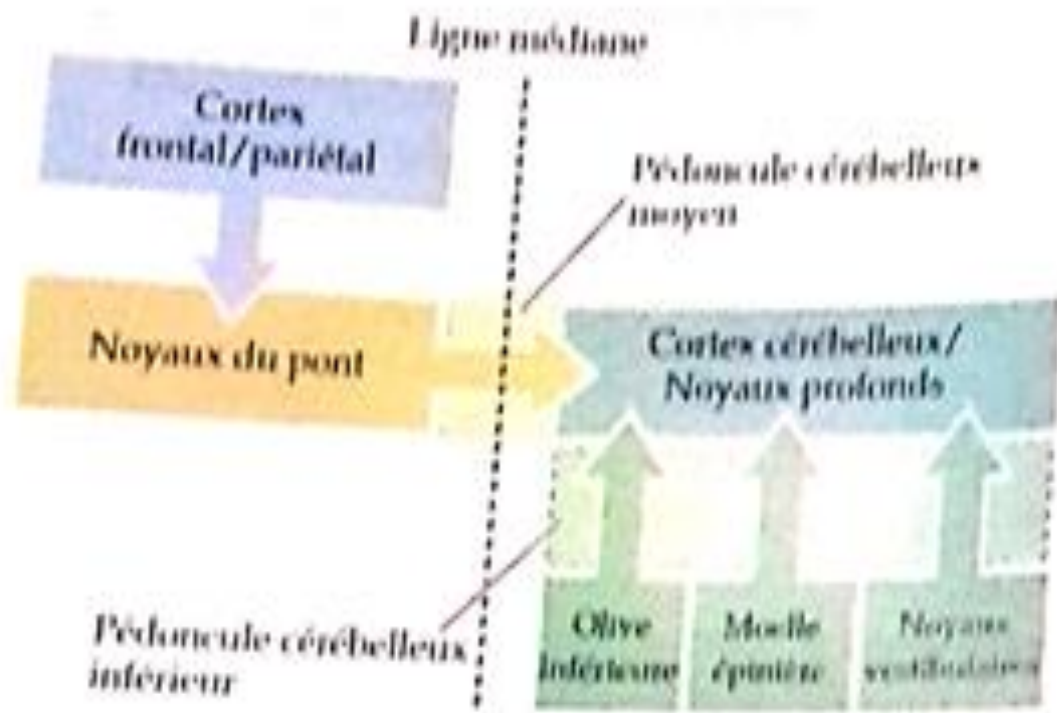
Alors les signaux qui proviennent d'un hémisphère cérébral sont reçus et traités par l'hémisphère cérébelleux controlatéral.

Les afférences sensorielles vestibulaires directes projettent sur le vestibulo-cervelet :

- Les fibres vestibulaires du nerf auditif (le VIII)
- Les fibres des noyaux vestibulaires du bulbe (noyau de Deiters).

Les afférences somesthésiques proprioceptives projettent sur le spino-cervelet :

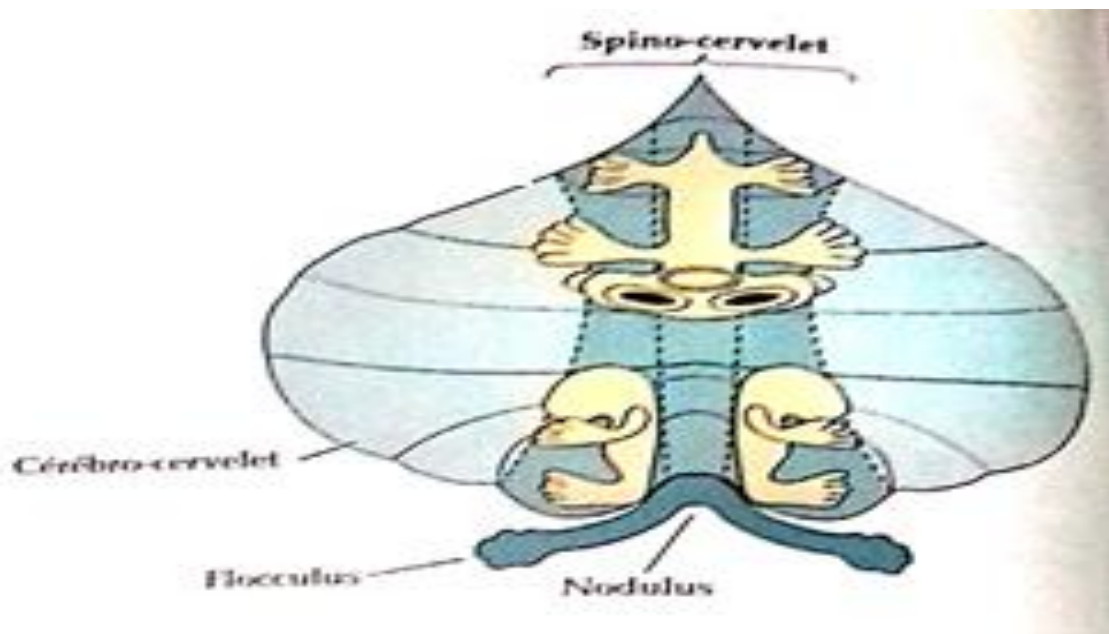
- Noyau de Clarke de la moelle : sensibilité proprioceptive de la partie inférieure du corps.
- Noyau cunéiforme du bas bulbe : sensibilité proprioceptive de la partie supérieure du corps.
- Noyau mésencéphalique du complexe trigéminal : sensibilité proprioceptive de la face.



Les afférences visuelles et auditives des noyaux du tronc cérébral qui se projettent sur le vermis.

Les afférences vestibulaires (afférences labyrinthiques), spinales (afférences des fuseaux neuro-musculaires), trigéminales, auditives et visuelles informent le cervelet sur l'environnement et sur la position du corps et de ses mouvements.

Les afférences somesthésiques se répartissent dans le spino-cervelet selon une représentation topographique dites (éclatées) : c.-à-d. que chaque portion de la surface du corps est représentée plusieurs fois par des amas de neurones non contigus (au moins deux fois).



Les afférences vestibulaires et spinales restent ipsilatérales par rapport à leur point d'entrée dans le tronc cérébral et empreinte le pédoncule cérébelleux inférieurs.

La totalité du cervelet reçoit des afférences modulatrices de **l'olive inférieure et du locus coeruleus** du tronc cérébral, qui ont un rôle dans l'apprentissage et la mémoire des circuits cérébelleux.

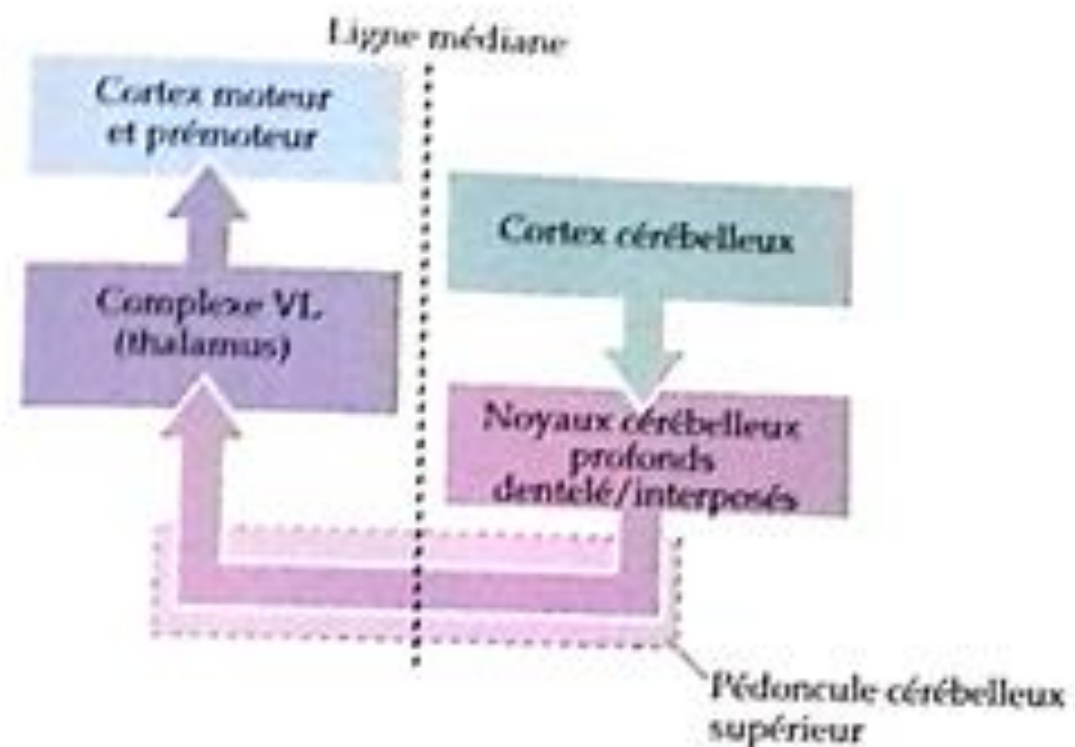
II-B-2- Les efférences cérébelleuses :

Le cortex cérébelleux projette sur les noyaux cérébelleux profonds et régule leurs activités ; les efférences de ces noyaux se projettent sur les neurones moteurs du cortex (après relais dans le tronc cérébral ou dans le thalamus) afin de moduler les divers aspects du contrôle moteur :

Les efférences cérébro-cérébelleuses du noyau dentelé projettent principalement sur les aires prémotrices et associatives du lobe frontal qui interviennent dans la planification des mouvements volontaires.

Cette voie croise la ligne médiane pour qu'elle se projette dans l'hémisphère cérébral controlatéral qui commande la moitié adéquate du corps.

Les axones du noyau dentelé quittent le cervelet par le pédoncule cérébelleux supérieur, croisent la ligne médiane dans la décussation du pédoncule cérébelleux supérieur au niveau du mésencéphale caudal, montent vers le complexe ventro-latéral du thalamus, puis se projettent sur le cortex prémoteur et associatif frontaux.



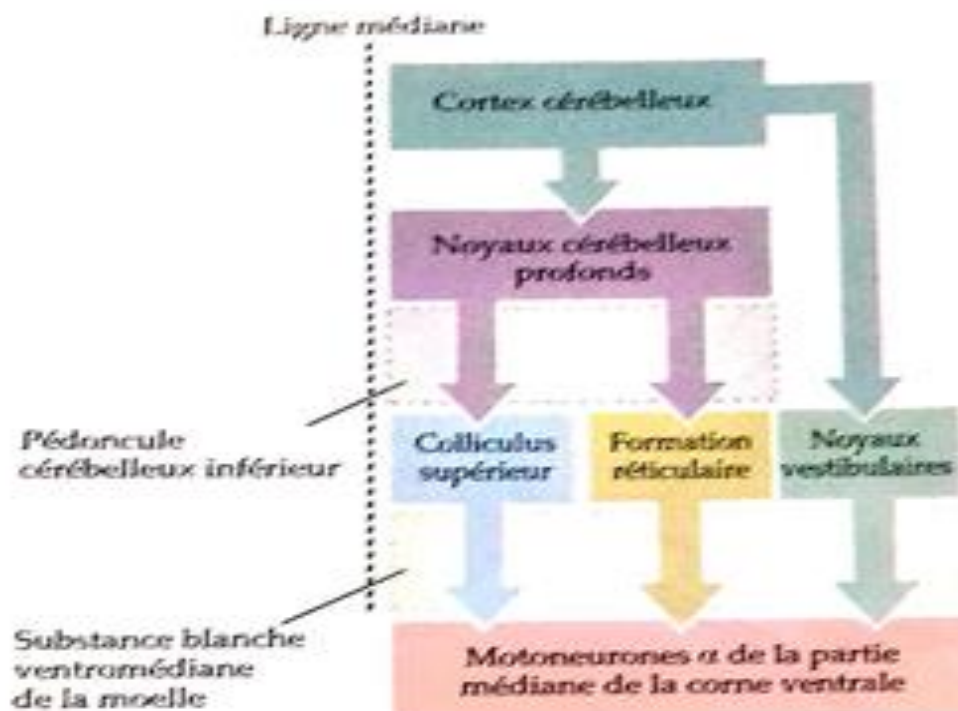
Le cérébro-cervelet donnent aussi des efférences vers des aires corticales non motrices mais cognitifs (cortex préfrontal) influençant ainsi des programmes non moteurs (comme les activités mentales de résolution de problèmes) par des projections en « boucles fermées » ; en d'autres termes une région corticale projette des afférences vers le cérébro-cervelet qui à leur tour renvoie des efférences vers la même région corticale.

Ces boucles fermées fonctionnent en parallèles avec des boucles ouvertes, recevant des afférences de plusieurs aires corticales et renvoyant des efférences vers les neurones moteurs des régions particulières des cortex moteur et prémoteur.

Alors le cervelet influence la coordination des programmes non moteurs de la même façon que pour les mouvements.

Les efférences spino-cérébelleuses projettent sur les neurones supra-segmentaires du cortex moteur et du tronc cérébral qui gouvernent l'exécution des mouvements, avec une somatotopie précise :

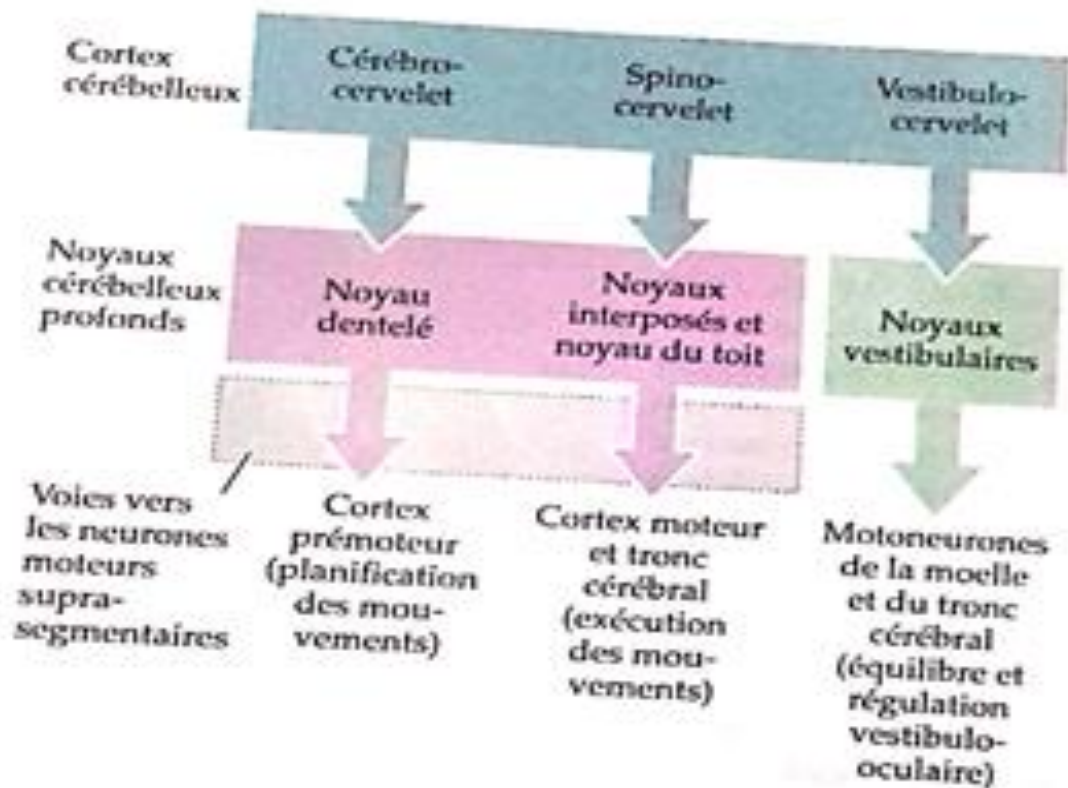
- **Les efférences vermiennes par l'intermédiaire du noyau du toit (fastigial)** qui se situe sous le vermis, près de la ligne médiane du cervelet ; projettent par l'intermédiaire du pédoncule cérébelleux inférieur, sur les noyaux de la formation réticulaire et du complexe vestibulaire à l'origine des faisceaux médians qui gouvernent la musculature axiale et proximale des membres et régule les mouvements oculaires.



- **Les efférences para-vermiennes par l'intermédiaire des noyaux interposés** qui occupent une position plus latérale ; projettent par l'intermédiaire du pédoncule cérébelleux supérieur sur les circuits thalamiques qui sont en relation avec les régions motrices du lobe frontal (cortex moteur primaire) et qui sont à l'origine des faisceaux cortico-spinaux impliqués dans la motricité volontaire des membres.

Les efférences vestibulo-cérébelleuses empruntent le pédoncule cérébelleux inférieur et se terminent sur les noyaux du complexe vestibulaire du tronc cérébral qui se projettent sur les motoneurones de la moelle et du tronc cérébral qui régissent l'équilibre et les

mouvements des yeux, de la tête et du cou pour compenser les accélérations rotationnelles et linéaires de la tête (la régulation vestibulo-oculaire).



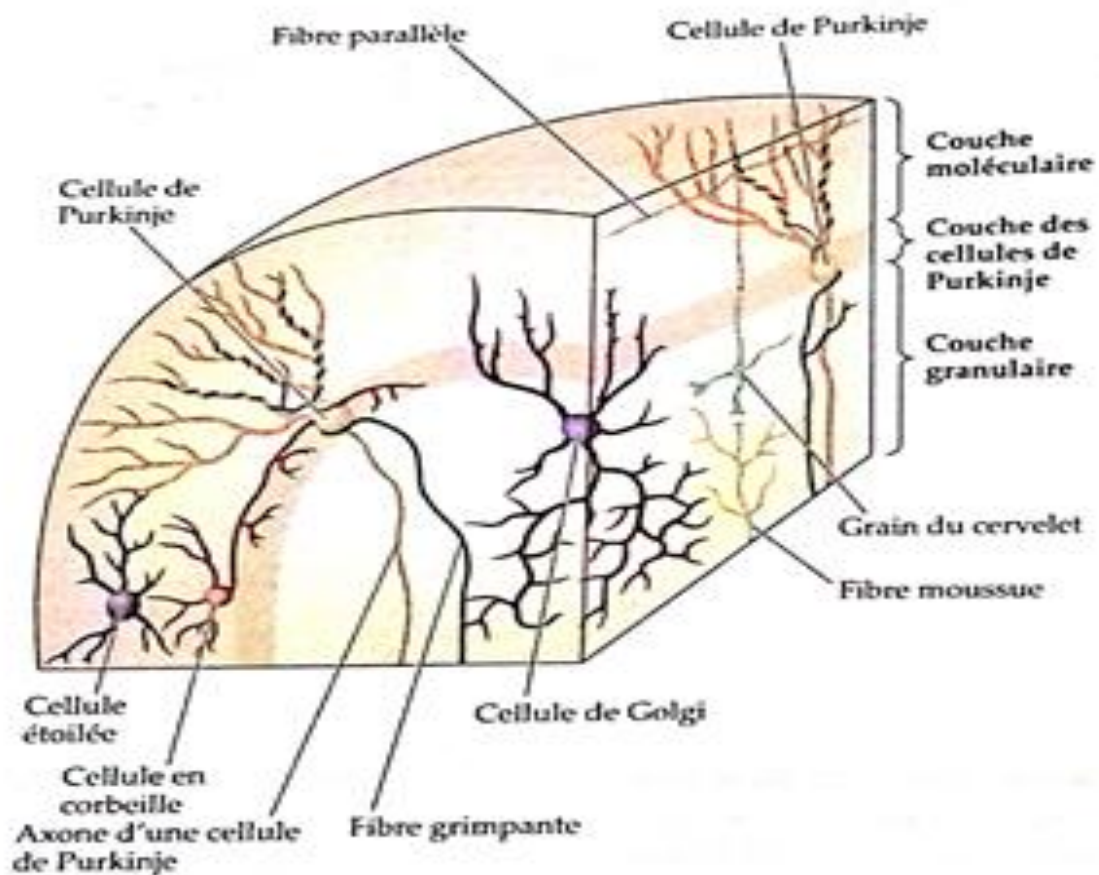
II-C- ASPECT MICROSCOPIQUE :

Une coupe perpendiculaire du cervelet fait apparaître l'écorce grise enveloppant la substance blanche.

L'écorce ou cortex cérébelleux est identique quelle que soit la région du cortex (ce qui diffère de celui du cortex cérébral). Il est subdivisé en trois couches :

- Couche superficielle ou moléculaire : elle renferme les neurones étoilés, les neurones en corbeille ou en panier et les fibres parallèles.
- Couche moyenne dite couche des **cellules de Purkinje**, l'unité fonctionnelle du cortex cérébelleux.
- Couche profonde ou granulaire : elle renferme les cellules granulaires (grains du cervelet), les interneurones de Golgi, les terminaisons des fibres moussues et les axones des fibres grimpanes.

La substance blanche est constituée par les fibres afférentes et efférentes de l'écorce et qui enveloppe les noyaux profonds intra-cérébelleux.



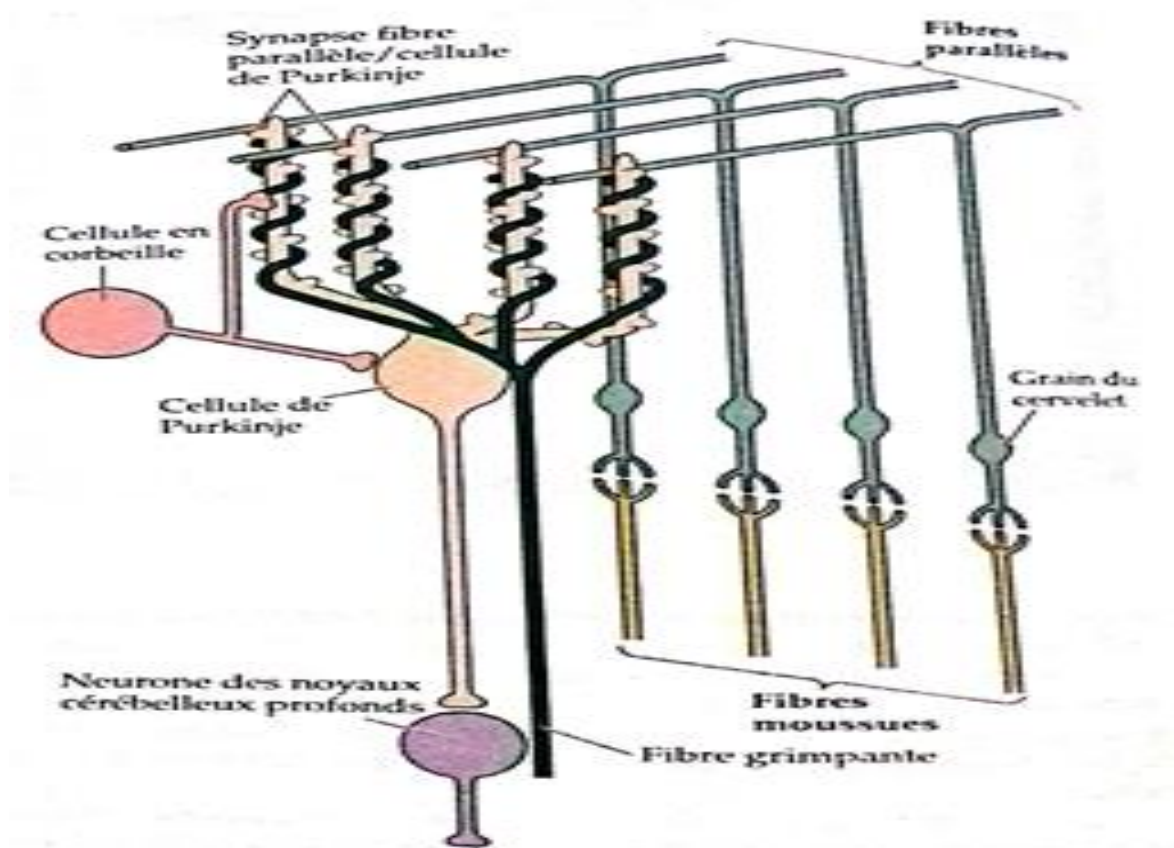
III/ CIRCUITS NEURONAUX ET TRAITEMENTS CEREBELLEUX :

Le traitement cérébelleux est parmi les traitements neuronaux le plus complexe mais grossièrement et de façon très simple :

- L'entrée de l'information se fait par les afférences qui arrivent aux noyaux profonds puis montent vers les cellules de Purkinje au niveau du cortex par deux voies : les fibres moussues et grimpantes.
- L'information traitée sort par la seule voie des cellules de Purkinje
- Des interneurons interviennent dans le traitement en réalisant des circuits locaux entre les entrées et la sortie.

Les voies afférentes (du cortex cérébral via les noyaux du pont, du tronc cérébral et de la moelle) sont appelées **fibres moussues** (en rapport avec l'aspect de leurs terminaisons synaptiques) arrivent au cortex cérébelleux afin que leurs messages se dirigent vers un neurone particulier appelé **cellule de Purkinje**.

Mais ces voies afférentes ne se dirigent pas directement vers les cellules de Purkinje (elles ne font pas des synapses directes) ; leurs axones font synapse sur **les cellules des grains** dans la couche granulaire du cortex cérébelleux.



Les grains du cervelet constituent la catégorie de neurones la plus abondante dans le système nerveux humain. Leurs axones, appelés **fibres parallèles** montent dans la couche moléculaire du cortex cérébelleux où ils bifurquent émettant des branches en T qui forment des synapses excitatrices (glutamate ou aspartate) avec les épines dendritiques des cellules de Purkinje.

Les cellules de Purkinje se trouvent dans la couche des cellules de Purkinje, elles ont des corps cellulaires géants qui se disposent sur une seule rangée et présentent des arborisations dendritiques très élaborées qui s'étendent dans la couche moléculaire à partir de leurs corps ; ces dendrites se ramifient abondamment dans un seul plan perpendiculaire au trajet des fibres parallèles.

Chaque cellule de Purkinje va recueillir les messages afférents d'un grand nombre de fibres parallèles (environ 200 000) et chaque fibre parallèle va faire synapse avec un nombre considérable de cellules de Purkinje (plusieurs dizaines de milliers).

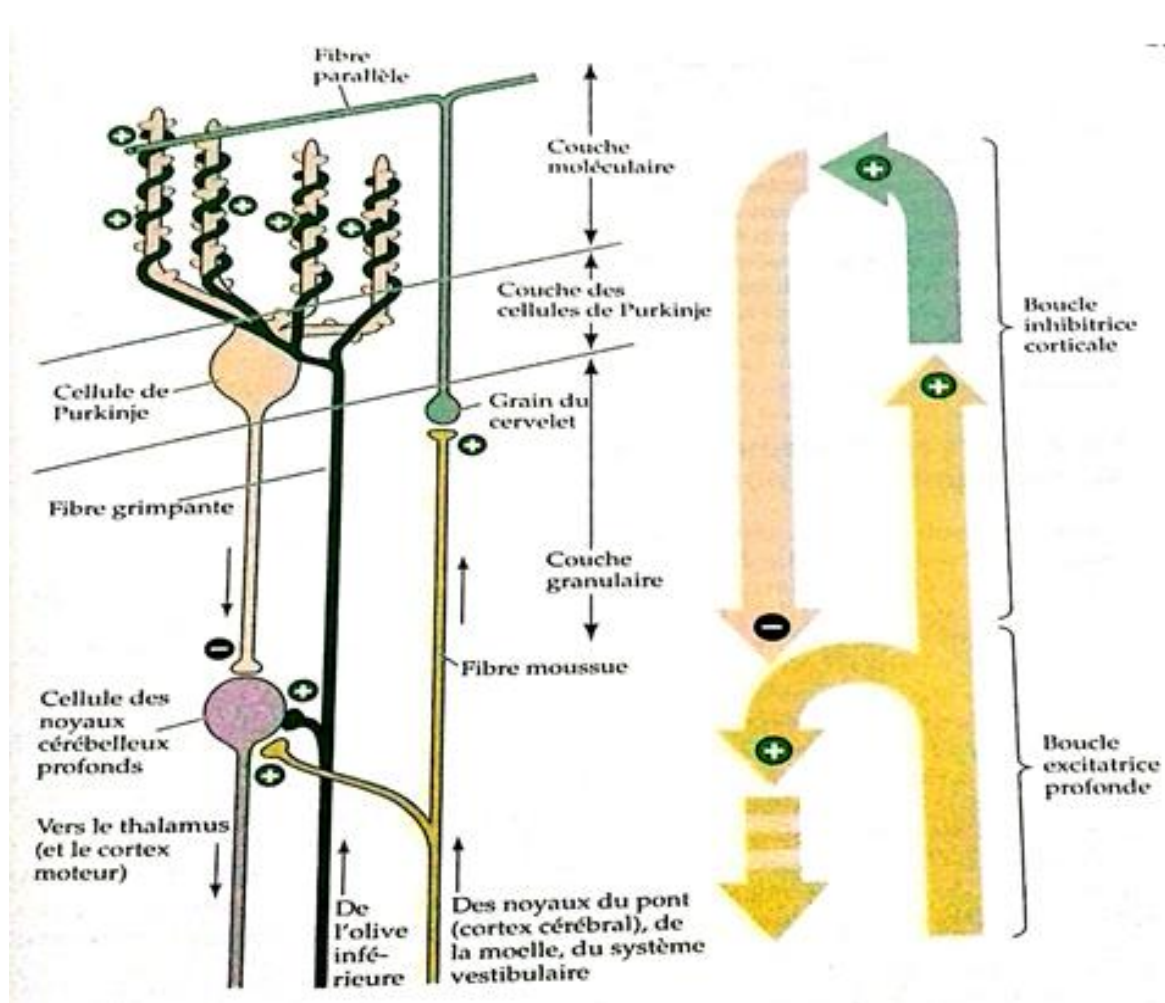
Par ailleurs les cellules de Purkinje reçoivent aussi autres afférences modulatrices directes sur leurs troncs à partir des **fibres grimpantes** qui proviennent toutes de (l'olive inférieure).

Chaque cellule de Purkinje reçoit de nombreux contacts synaptiques d'une seule fibre grimpante.

Les fibres grimpantes régulent les mouvements en **modulant l'efficacité** de la connexion entre la chaîne de : fibres moussues-fibre parallèles et les cellules de Purkinje.

Les cellules de Purkinje sont les seules cellules efférentes du cortex cérébelleux. Elles projettent sur les noyaux cérébelleux profonds. Elles sont **GABAergiques ; inhibitrices**.

Les noyaux cérébelleux profonds reçoivent des afférences excitatrices de collatérales des fibres moussues et des fibres grimpantes.



Les projections inhibitrices des cellules de Purkinje servent à structurer la décharge qu'émettent les neurones des noyaux profonds en réponse à ces afférences excitatrices directes de fibres moussues et grimpantes.

L'activité inhibitrice des cellules de Purkinje est elle-même modulée par des **afférences inhibitrices** de neurones de circuits locaux :

- Les plus puissantes de ces afférences locales sont celles des **cellules en corbeille (GABA)** qui forment des synapses inhibitrices sur les somas des cellules de Purkinje.

- Autres neurones inhibiteurs des circuits locaux sont les **cellules étoilées (taurine)** qui reçoivent des afférences des fibres parallèles et forment des synapses inhibitrices sur les dendrites des cellules de Purkinje.
- Autres neurones inhibiteurs appelés **cellules de Golgi (GABA)** dont leurs corps cellulaires sont situés dans la couche granulaire et leurs dendrites apicaux sont situés dans la couche moléculaire.
Ces cellules de Golgi reçoivent des afférences des fibres parallèles et renvoient un feedback inhibiteur vers les grains du cervelet qui sont à l'origine des fibres parallèles.

Alors ; le traitement cérébelleux passe par :

- **L'Activité des noyaux profonds** :

Les collatérales des fibres moussues et des fibres grimpantes provoquent l'activation des neurones des noyaux cérébelleux profonds : c'est une boucle excitatrice dans laquelle des signaux afférents convergent sur les organes de sortie des traitements cérébelleux.

Cependant l'information entrante des noyaux cérébelleux est modulée par les influences inhibitrices descendantes des cellules de Purkinje :

- **L'Activité des cellules de Purkinje** :

Les cellules de Purkinje intègrent les deux grands courants d'afférences des fibres moussues et grimpantes et inversent leur « **signe** » en répondant à un signal d'entrée excitateur par un signal de sortie inhibiteur.

Les cellules de Purkinje transmettent donc le résultat de calculs réalisés par **une boucle inhibitrice** qui englobent les circuits du cortex cérébelleux comprenant : les cellules de Purkinje elles-mêmes et les interneurons des couches granulaires et moléculaires :

Les cellules de Golgi, les cellules étoilées et les cellules en corbeille contrôlent le flux des informations dans le cortex cérébelleux.

Les cellules de Golgi : forment un circuit rétroactif inhibiteur qui contrôle le gain de transmission entre les grains et les cellules de Purkinje.

Les cellules en corbeilles : exercent une inhibition latérale qui focalise la distribution spatiale des cellules de Purkinje.

IV/ LES ATTEINTES DU CERVELET ET SA SEMIOLOGIE :

Le cervelet sert d'interface sensorielle à l'environnement que le système nerveux moteur utilise pour coordonner le mouvement.

Malgré l'importance du cervelet dans le mouvement, son ablation ou son atteinte ne provoque pas de paralysie ou de parésie mais la qualité d'exécution des mouvements est médiocre.

L'atteinte cérébelleuse entraîne une désorganisation dans la chronologie temporelle qui coordonne les mouvements complexes multiarticulaires -multimusculaires (agonistes-antagonistes) intervenant dans les aspects des mouvements : équilibre, posture, marche, précision du geste, parole et fixation visuelle... .

En connaissant les afférences, les efférences et le rôle de chaque division anatomo-fonctionnelle ; on peut classer les désordres fonctionnels de chaque division :

IV-A- ATTEINTES DU CEREBRO-CERVELET :

Le cérébro-cervelet est constitué des régions latérales ; il joue un rôle dans l'amélioration de la précision motrice.

Il planifie, initie et guide les mouvements de manière prédictive ; c.-à-d. que le cérébro-cervelet prévoit la vitesse, la force, et la direction d'un mouvement avant que celui-ci ait lieu.

Ainsi la procédure motrice est différente entre prendre une part de gâteau, une chaise ou un objet plus lourd.

Notre connaissance passée (du gâteau et de la chaise) est suffisante pour créer une stratégie motrice appropriée pour chaque objet (mémorisation motrice).

IV-B- ATTEINTES DU SPINO-CERVELET :

Le spino-cervelet est constitué de deux parties :

- La partie paramédiane (para-vermienne) du spino-cervelet intervient principalement dans les mouvements des muscles distaux.
- La partie médiane du spino-cervelet (le vermis) intervient dans la motricité des muscles proximales et régule les mouvements oculaires.

Une atteinte du spino-cervelet (les deux parties) perturbe la musculature distale (ataxie cérébelleuse) et la musculaire proximale (troubles de l'équilibre) et des troubles dans la régulation des mouvements oculaires.

IV-C- ATTEINTES DU VESTIBULO-CERVELET :

Le vestibulo-cervelet est constitué du lobe flocculo-nodulaire.

Grace aux relations étroites qu'il entretient avec le système vestibulaire il régisse l'équilibre et les mouvements des yeux, de la tête et du cou pour compenser les accélérations rotationnelles et linéaires de la tête (la régulation vestibulo-oculaire).

Une lésion du vestibulo-cervelet entraîne des troubles de l'équilibre, de la marche, de la posture et des troubles des mouvements des yeux (nystagmus).

IV-D- SEMILOGIE CLINIQUE :

Une atteinte du cervelet se traduit par une symptomatologie riche :

- L'ataxie cérébelleuse :

L'atteinte du spino-cervelet (surtout des régions para-vermiennes) qui coordonnent la musculature distale (les extrémités) se traduit par une démarche chancelante (qui ressemble à celle de l'ivresse).

Les patients ataxiques peuvent compenser relativement se trouble en élargissant leur polygone de sustentation.

Un des tests diagnostiques de l'ataxie cérébelleuse est l'épreuve de la marche en ligne droite en plaçant un pied devant l'autre.

- La dysmétrie :

C'est l'incapacité d'évaluer la distance d'une cible avec précision.

Le mouvement destiné à atteindre une cible la dépasse et peut s'accompagner d'oscillations et de tremblements jusqu'à ce que le patient arrive au but.

- L'adiadococinésie :

C'est l'incapacité de faire des mouvements alternatifs rapides, comme des mouvements de pronation-supination avec les mains tapant rapidement sur les cuisses.

- Décomposition des mouvements :

Elle résulte de l'incoordination entre les muscles agonistes et antagonistes ce qui donne un mouvement saccadé (comme les mouvements des « premiers robots ! »).

