

Le cerveau musicien

Pseudonyme : sgar08

« La musique exprime ce qui ne peut pas s'exprimer avec des mots
et sur quoi il est impossible de se taire. »

Victor Hugo

SOMMAIRE

Remerciements	5
Introduction.....	6
Structure de l'encéphale humain	8
Le cerveau	8
Les lobes	9
Le cortex cérébral	10
Le cervelet	11
Les parties du cervelet.....	11
Les fonctions du cervelet	12
Le tronc cérébral	13
Les composantes du tronc cérébral.....	13
Le corps calleux	14
La structure du corps calleux.....	15
Le thalamus	15
Les noyaux thalamiques	15
Les fonctions du thalamus	16
L'hypothalamus.....	17
Les fonctions de l'hypothalamus.....	17
L'hypophyse.....	18
La structure de l'hypophyse	18
La moelle épinière.....	19
L'hippocampe.....	20
Organisation cellulaire.....	21
Les cellules gliales.....	21
Les neurones	23
Types de neurones	23
La structure du neurone.....	24

La transmission neuronele	29
La transmission synaptique.....	29
La synapse électrique	29
La synapse chimique	30
Les neurotransmetteurs	33
Neurotransmeteurs à petite molecule	33
Neuropeptides	35
Le traitement cérébrale de la musique	36
Le traitement cérébral chez l'auditeur	38
Le traitement cérébral chez le musicien.....	40
Plasticité cérébrale.....	43
Les effets cognitifs de la pratique musicale	47
Travail pratique.....	51
Résultats	54
Conclusions.....	55
Bibliographie.....	57
Webographie	60

Remerciements

Je remercie, tout d'abord, à la tutrice de mon travail, qui a été mon guide tout au long du travail, pour m'avoir aidé et pour s'y être intéressée autant.

Je souhaiterais aussi exprimer ma gratitude à Mme. Bonet, neuropsychologue, pour m'avoir conseillé et aidé à réaliser la partie pratique. Je remercie également à toute personne qui a collaboré dans celle-ci.

J'adresse aussi mes remerciements à Marina Bonilla, pour la correction et lecture de mon travail.

INTRODUCTION

Mon travail de recherche, intitulé « Le cerveau musicien », a l'objectif de démontrer que l'étude de la musique proportionne une amélioration des fonctions cognitives, concrètement de la mémoire de travail.

Depuis que j'étais petite, mes parents se sont toujours intéressés et on voulu que j'apprenne de la musique, car je passais mes journées à chanter et à écouter des chansons ; j'ai toujours aimé la musique. C'est depuis la lecture d'un article qui parlait sur l'amélioration des résultats chez des élèves étudiants de musique que je me suis demandé comment la musique pouvait arriver à stimuler le cerveau.

Souvent, on s'émotionne quand on entend une musique concrète qui peut nous rappeler quelque situation dans notre vie, ou simplement on s'émotionne sans savoir la raison. En fait, les émotions sont causées par une réaction chimique, mais pourrait-on dire que la musique a seulement un effet émotionnel ? Pas du tout. Si on accepte cette dernière affirmation, comment expliquer cette « amélioration » chez les musiciens ? Des dernières études en neurosciences montrent des différences très notables entre le cerveau musicien et celui non-musicien, qui permettent de voir l'immense effet que la musique produit sur le cerveau.

Au début, j'étais intéressée à baser mon travail sur une comparaison entre l'activité cérébrale d'un musicien et un non-musicien en écoutant un fragment concret de musique. Néanmoins, j'ai été incapable d'avoir accès à aucune des techniques d'imagerie. À ce moment, j'ai contacté avec Judit Bonet, neuropsychologue, qui m'a montré une seconde option pour pouvoir répondre mon hypothèse : la réalisation d'une partie concrète d'un test de coefficient intellectuel, qui montrera les différences cognitives entre sujets musiciens et non-musiciens. Ayant lu plusieurs articles, je me suis décidée pour la mémoire de travail, car je trouvais que c'était l'une des fonctions les plus intéressantes. J'ai donc établi mon hypothèse : les élèves étudiants de musique ont une meilleure mémoire de travail.

Pour pouvoir aborder l'effet de la musique, j'ai dû, en premier lieu, comprendre le fonctionnement du cerveau. J'ai structuré donc mon travail en trois parties : une explication de l'anatomie et du fonctionnement du cerveau, une recherche sur le traitement cérébrale de la musique et l'influence qu'elle exerce si l'on le pratique à long terme et, pour finir, le travail pratique.

STRUCTURE DE L'ENCÉPHALE HUMAIN

L'encéphale représente la partie majeure du cerveau humain et est associée à des fonctions supérieures comme le contrôle des comportements volontaires. Il reçoit et interprète les signaux nerveux du corps et réagit selon ces informations.

L'encéphale est constitué de 3 parties principales : le cerveau, le cervelet et le tronc cérébral.

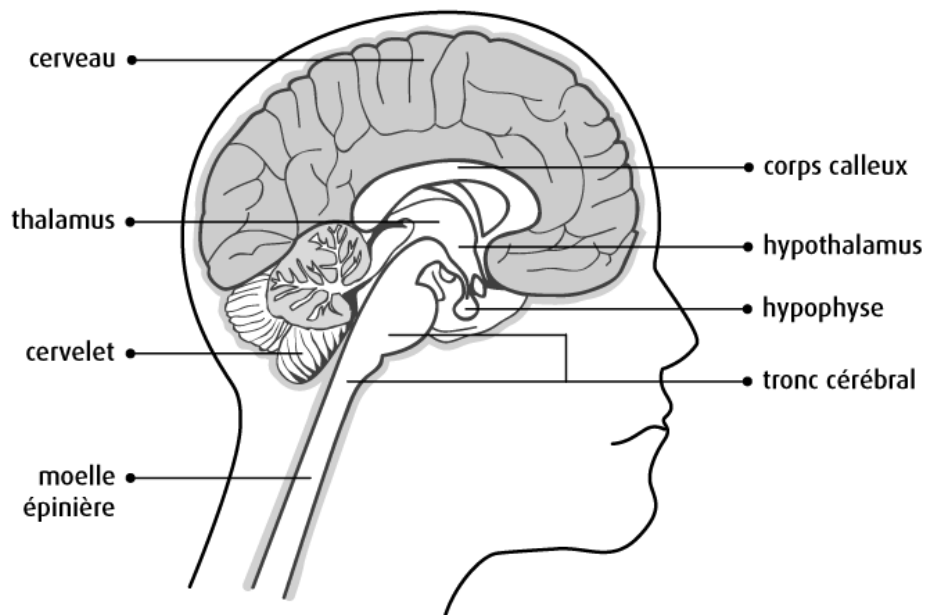


Photo 1: Structure de l'encéphale

Source: www.cancer.ca

• LE CERVEAU

Le cerveau est la partie la plus volumineuse de l'encéphale. Il est composé de deux hémisphères : l'hémisphère droit et l'hémisphère gauche, eux-mêmes reliés entre-deux par un pont de fibres nerveuses appelé corps calleux. Ces deux hémisphères contrôlent l'ensemble de nos fonctions mentales supérieures (intellectuelles).

Dans la périphérie, on y retrouve la substance grise ou cortex cérébral, la partie des tissus du système nerveux central composée essentiellement des corps cellulaires (noyau et autres parties essentielles cellulaires) et de l'arbre dendritique des neurones (courts prolongements fibreux qui reçoivent des signaux nerveux), ainsi que de certaines cellules gliales. Elle se trouve également à l'intérieur, au centre de la moelle épinière.

Quant à la partie interne, elle est constituée par la substance blanche, un autre tissu du système nerveux central qui est principalement composé d'axones (longues fibres des cellules nerveuses) associés à des gaines de myéline. Son enveloppe grasseuse des axones (myéline) donne à cette partie du cerveau une teinte blanchâtre. Cette substance relie différentes aires de la substance grise où se situent les corps cellulaires des neurones qui transmettent les impulsions nerveuses. De plus, elle constitue la partie superficielle de la moelle épinière.

De l'autre côté, le cerveau est creusé de ventricules remplis de liquide céphalorachidien, qui a une fonction protectrice.

Chaque hémisphère est subdivisé par des scissures formant les lobes qui sont creusés par des sillons formant des circonvolutions.

- **Les lobes**

- Le lobe frontal : contrôle les mouvements, le langage, le comportement, la mémoire, les émotions et les fonctions intellectuelles comme la réflexion, le raisonnement, la résolution de problèmes, la prise de décisions et la planification.
- Le lobe pariétal contrôle les sensations comme le toucher, la pression, la douleur et la température. Il commande aussi la compréhension de la taille, de la forme et de la direction, ce qu'on appelle l'orientation spatiale.

- Le lobe temporal : contrôle l'ouïe, la mémoire et les émotions. Le lobe temporal dominant, soit le côté gauche chez la plupart des droitiers, soit le côté droit pour les gauchers, commande aussi le langage.
- Le lobe occipital : contrôle principalement la vision.

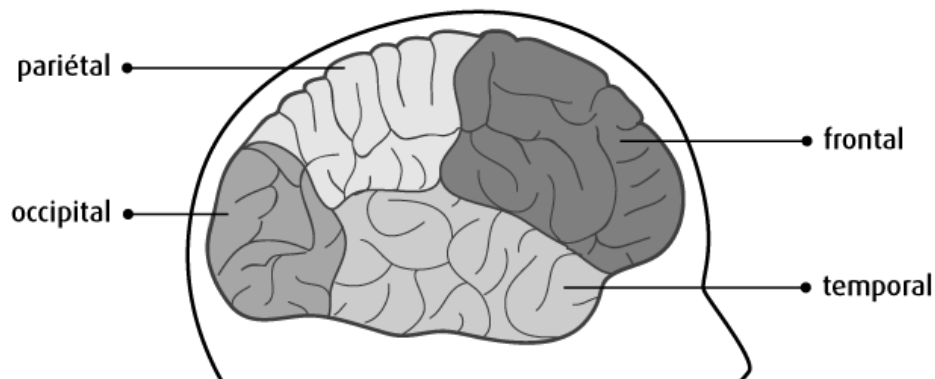


Photo 2: Les lobes cérébraux Source: www.cancer.ca

• Le cortex cérébral

Le cortex cérébral est un tissu organique recouvrant les deux hémisphères du cerveau. Comme on a déjà mentionné, le cortex est formé de substance grise

(variété de tissus nerveux contenant les corps cellulaires). Il participe à de nombreuses fonctions cognitives notamment entre autres, certains sens, le langage, les actions volontaires de la motricité et de la mémoire.

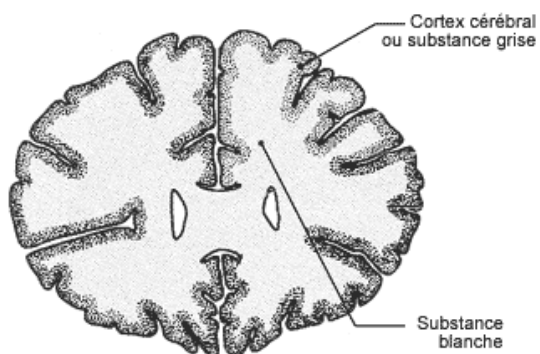


Photo 3: Cortex et substance blanche
Source: <http://recap-ide.blogspot.com.es>

• LE CERVELET

Le cervelet est situé sous les hémisphères cérébrales et en arrière d'une partie du tronc cérébral (le *Pont*) et, comme son nom indique (petit cerveau), est aussi composé de deux hémisphères, chacun divisé en dix lobules petits, autour d'une région médiane appelée vermis. Toutes ces connexions avec d'autres parties du cerveau transitent par ce *Pont*.

La plus grande partie de son volume est constitué d'une couche de matière ou substance grise appelée cortex cérébelleux, contenant le corps cellulaire des neurones cérébelleux. Dessous ce cortex on trouve la matière blanche et quatre noyaux cérébelleux profonds.

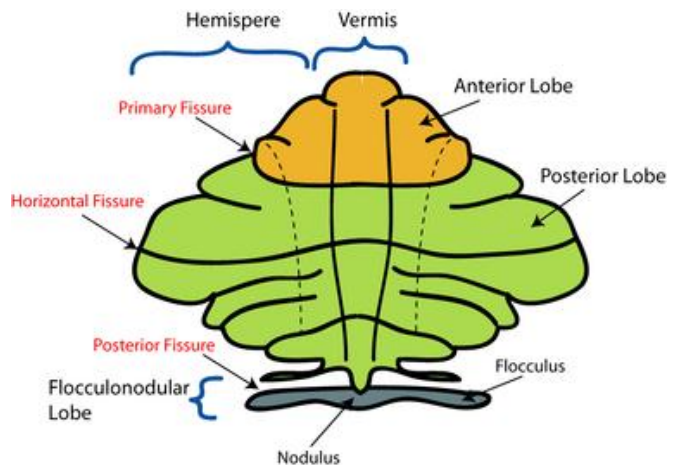


Photo 4: Le cervelet Source: <http://fr.wikipedia.org>

D'ailleurs, le cervelet c'est l'unique partie du cerveau qui contient des cellules de Purkinje, une sorte de neurone qui permet de réguler l'activité des neurones et accompagne leur croissance et lui permettent une remarquable capacité de traitement du signal ; ceci le convertit en une sorte de neurone essentiel. En plus, le cervelet contient plus de neurones que toutes les autres parties du cerveau mises ensemble.

• Les parties du cervelet

On distingue 3 parties différentes au niveau du cervelet :

- L'archécérébellum : Il est formé de deux parties latérales appelées flocculus et d'un nodule médian. L'ensemble de ces trois parties est appelé lobe flocculo-nodulaire et il est impliqué dans le maintien de l'équilibre. L'archécérébellum reçoit l'information sensorielle provenant du système vestibulaire.

- La paléocérébellum : il comprend la partie centrale du cervelet, le vermis. Il est connecté avec la moelle épinière et le tronc cérébral, il participe donc à la régulation de la posture.
- Le néocérébellum : Cette partie comprend les deux hémisphères cérébelleux et assure la régulation des activités musculaires volontaires.

- **Les fonctions du cervelet**

Avant les années 1990, on croyait que la fonction du cervelet était seulement relative au contrôle moteur : le cervelet contribue à la coordination et la synchronisation des gestes et à la précision des mouvements. Mais les découvertes les plus récentes ont remis en cause ce point de vue : le cervelet s'implique aussi en les fonctions cognitives du cerveau :

- Langage : composition syntaxique et grammaticale en général, articulation et création des mots, compréhension orale et l'établissement de relation sémantique entre mots.
- Habiletés visuo-spatiales : construction ou rotation mentale d'images.
- Mémoire et apprentissage : mémoire procédimentale, mémoire opérative verbale, habitudes et sensibilisation, apprentissage des habiletés motrices, habitudes et comportements et il s'active devant l'apprentissage de séquences complexes.
- Fonctions exécutives (liées au cortex préfrontal dorsolatéral) : fonctions cognitives complexes qui requièrent la participation d'autres structures cérébrales que le cervelet comme la planification, la flexibilité cognitive, le raisonnement abstrait, la mémoire de travail, à la fluidité verbale et à l'inhibition. Certaines études suggèrent que le cervelet peut être activé pendant la prise de décision ou pendant la coordination de deux tâches en même temps, augmentant la vitesse et l'automatisation des nouveaux mouvements.

- Attention : intervient dans les activités d'attention sélective ou dans d'autres fonctions plus complexes qui requièrent de l'attention comme le calcul.
- Personnalité et émotion : Certaines études démontrent le rôle du cervelet dans le contrôle et la modulation des émotions. De plus, celui-ci est également lié à la personnalité, gérant les comportements appropriés ou inappropriés selon le contexte.

• LE TRONC CÉRÉBRAL

Le tronc cérébral est une portion dilatée du névraxe qui est placé au centre de la fosse, sous le cerveau et en avant du cervelet, au-dessus de la moelle épinière. Comme elle, le tronc cérébral est formé de substance grise entourée de faisceaux de substance blanche.

Il inclut notamment une zone chargée de réguler le cœur et la respiration. Le tronc cérébral est le siège des comportements automatiques de survie. De plus, il est essentiel à l'innervation de la tête par 10 paires de nerfs crâniens (III à XII).



Photo 5: Le tronc cérébrale
Source: <https://sites.google.com/site/aphysionado/>

• Les composantes du tronc cérébral

Le tronc cérébral présent à décrire 3 parties :

- Le bulbe rachidien

Le bulbe rachidien est la partie la plus caudale du tronc cérébral qui se fait suite à la moelle épinière : il est formé de substance grise entourée de faisceaux de substance blanche. Il est une structure essentielle dans du système nerveux autonome, en majorité inconscient, en régulant les fonctions cardiorespiratoires, circulatoires et digestives.

- Le pont de Varole

Le pont de Varole est la partie moyenne du tronc cérébral, situé entre le bulbe et le mésencéphale. Il est formé en plus des noyaux gris pontiques et des voies ascendantes et descendantes de fibres transversales. La substance blanche qu'il contient est traitée dans les grandes voies du tronc cérébral. Il joue un rôle important dans la motricité notamment par sa position de relais entre le cerveau et le cervelet mais contribue aussi à la sensibilité du visage et aux fonctions autonomes.

- Le mésencéphale

Le mésencéphale est la partie la plus rostrale du tronc cérébral qui fait suite au Pont de Varole. Le mésencéphale régit des fonctions élémentaires comme l'attention, l'habituation, le sommeil et les mouvements de la tête et du cou.

• LE CORPS CALLEUX

Le corps calleux est une structure localisée au sein de l'encéphale. C'est un faisceau d'axones interconnectant les deux hémisphères cérébraux. Le corps calleux assure donc le transfert d'informations entre eux et ainsi leur coordination. De plus, il est la plus importante commissure du cerveau car elle relie les quatre lobes du cerveau entre eux.

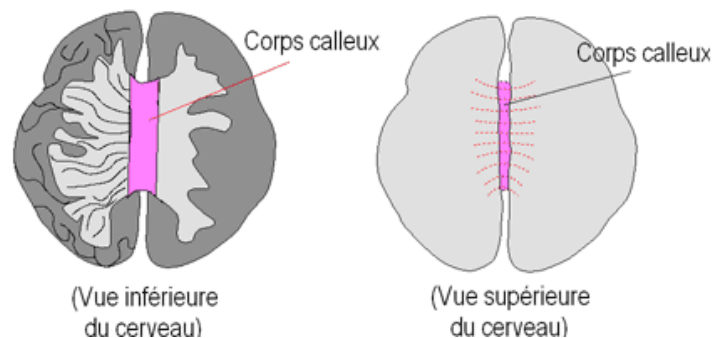


Photo 6: Le corps calleux

Source: www.sommeil-paradoxal.com

- **La structure du corps calleux**

Le corps calleux est constitué de quatre zones distinctes, d'avant en arrière :

- Le rostrum : relie les lobes frontaux gauche et droit.
- Le genou : relie les lobes pariétaux gauche et droit
- Le tronc : relie les lobes temporaux gauche et droit.
- Le sélénium : relie les lobes occipitaux gauche et droit.

- **LE THALAMUS**

Le thalamus est une structure symétrique qui fait partie du diencephale. Il occupe une place centrale dans le cerveau et est relié à son homologue dans l'autre hémisphère par l'adhésion interthalamique. Le thalamus entretient des relations étroites avec le cortex cérébral. Le thalamus est formé principalement de noyaux (il y en a une trentaine) dont chacun est relié par la radiation thalamique (une partie de la capsule interne) de façon réciproque avec une partie bien précise du cortex cérébral.

Donc, le thalamus est indispensable à la fonction du cortex, car une destruction d'un de ses noyaux entraîne une perte de fonction de la région qui lui est relié.

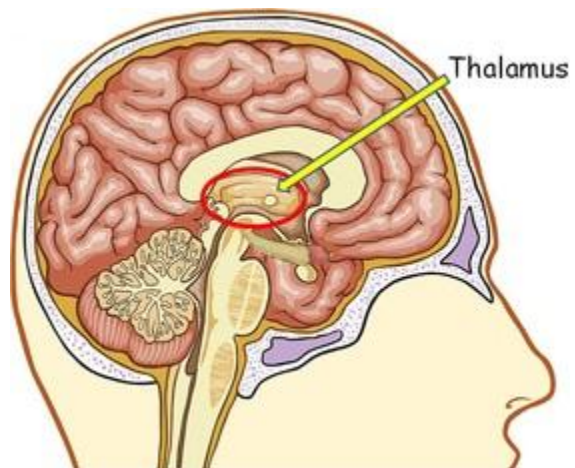


Photo 6: Le thalamus

Source: www.brainmadesimple.com

- **Les noyaux thalamiques**

Le thalamus se compose de trois groupes de cellules ou noyaux qui se comprennent en :

- Noyaux sensoriels de relais

Ces noyaux transmettent par relais des sensations primaires, en relayant l'information sensorielle particulière à la zone corticale correspondante.

- Noyaux d'Association

Ceux-ci reçoivent la puissance d'entrée des zones particulières du cortex cérébral, qui est alors projeté de nouveau au cortex cérébral aux zones d'association quelque peu généralisées, où ils réglementent l'activité.

- Noyaux Non Spécifiques

Ceux-ci reçoivent la puissance d'entrée du cortex cérébral et de l'information de projet diffusément par elle. La plupart de ces noyaux interconnectent l'activité cérébrale entre différentes régions du cerveau et jouent un rôle fonctionnel général, comme l'alerte.

- **Les fonctions du thalamus**

Le thalamus a deux fonctions principales :

- Fonction de relais : toutes les voies sensorielles font synapse dans le thalamus. Les informations sous-corticales (cervelet, ganglions de la base, ...) destinées au cortex moteur font synapse dans le thalamus. Ainsi, le thalamus a un rôle important également dans le système moteur.
- Fonction modulatrice: par exemple lors de l'activation du cortex dans une situation d'alarme (stress, danger, éveil,...).

- **L'HYPOTHALAMUS**

L'hypothalamus est une glande du cerveau localisée entre le thalamus et le tronc cérébral, qui sert de pont entre le système nerveux autonome et le système endocrinien. Il est constitué de nombreuses paires de noyaux formés de cellules nerveuses situés au-dessus de l'hypophyse avec qui est relié par la tige pituitaire.

Les neurones de l'hypothalamus synthétisent les différentes hormones et les libèrent dans un premier réseau de capillaires qui se rassemblent pour former une veine, un système qui transportera les hormones de l'hypothalamus vers l'hypophyse, où les hormones activeront les neurones hypophysaires.

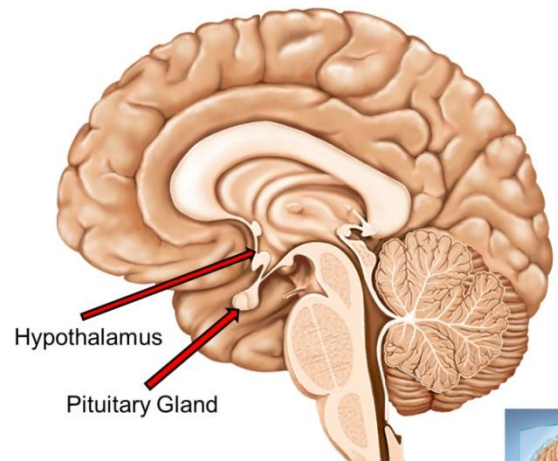


Photo 7: L'hypothalamus
Source: www.brainmadesimple.com

- **Les fonctions de l'hypothalamus**

L'hypothalamus constitue un capteur et un centre intégrateur du corps : il intègre des stimuli périphériques (hormonaux, humoraux et nerveux) et y répond par la modulation de la sécrétion des hormones hypothalamiques. Chez les mammifères, cela se manifeste, parmi autres, par une faible variation de la température corporelle et de la composition du sang. L'hypothalamus contrôle ces niveaux par un processus de régulation appelé homéostasie, qui maintient de conditions internes constantes, pour les conditions externes variables.

- **Fabrication d'hormones**

L'hypothalamus fabrique deux hormones qui seront stockées dans l'hypophyse puis libérées dans le sang à la demande :

- L'hormone antidiurétique : récupère la plupart de l'eau filtrée par le rein à partir du sang.
- L'ocytocine qui stimule l'utérus et lui permet de se contracter durant l'accouchement.

- La fabrication des facteurs stimulants

L'hypothalamus produit des facteurs stimulants qui agissent sur l'hypophyse, laquelle stimule d'autres glandes de l'organisme (comme la thyroïde, la surrénale, les ovaires, etc.).

- La vie végétative

L'hypothalamus a une action sur de nombreux organes du corps comme le cœur, les intestins, les poumons, en régulant leur activité.

- La régulation des grandes fonctions vitales

La faim, la soif et la température sont directement sous le contrôle de l'hypothalamus. C'est donc une sorte d'horloge interne, de régulation inconsciente de toute notre vie.

- **L'HYPOPHYSE**

L'hypophyse est une glande endocrine qui est divisée en deux globes et, comme on l'a déjà dit, il est relié à l'hypothalamus et répond à ses stimuli en synthétisant à son tour des hormones spécifiques qui sont libérées dans le sang.

- La structure de l'hypophyse

- L'antéhypophyse

L'antéhypophyse contient de nombreux types cellulaires différents qui sécrètent plusieurs hormones. D'ailleurs, il est aussi en relation avec l'hypothalamus par

une veine appelée hypothalamo-hypophysaire, qui permet le transport de neurohormones sécrétés par l'hypothalamus.

- Posthypophyse

La posthypophyse ou neurohypophyse est une projection de l'hypothalamus, qui consiste en une agglomération d'axones projetés par les noyaux contenant les corps cellulaires des neurones. Les axones vont sécréter dans des capillaires sanguins avec qui sont en contact le contenu des granules de sécrétion qu'ils contiennent, qui vont libérer les deux neurohormones qui sont sécrétées au niveau de la neurohypophyse, soit la vasopressine et l'ocytocine.

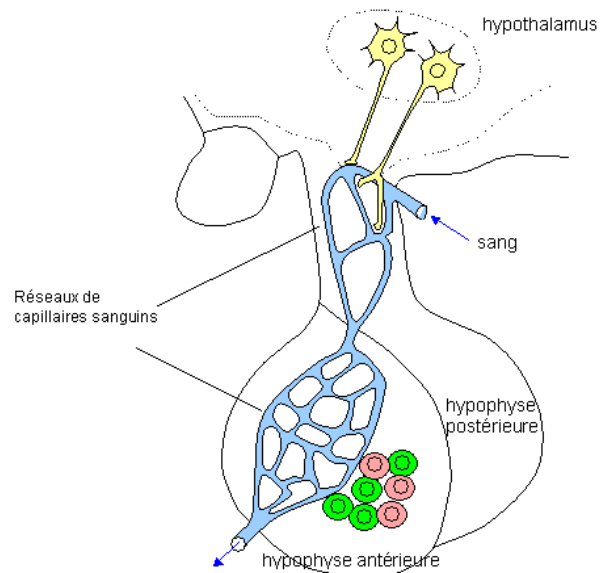


Photo 8: L'hypophyse Source: www.intellego.fr

• LA MOELLE ÉPINIÈRE

La moelle épinière, désigne la partie du système nerveux central qui se prolonge en dessous du tronc cérébral au niveau du bulbe rachidien. Elle est contenue dans le canal rachidien (canal formé par la juxtaposition des foramens des vertèbres), qui la soutient et la protège.

Elle est constituée de neurones et de cellules gliales. Elle a plusieurs circuits avec différentes fonctions :

- Un circuit descendant relayant les informations motrices vers les muscles
- Un circuit ascendant véhiculant les informations sensorielles vers le cerveau
- Un centre de coordination de certains réflexes

Elle contient également des circuits neuronaux indépendants qui contrôlent un certain nombre de réflexes.

• L'HIPPOCAMPE

L'hippocampe est une structure du cerveau des mammifères. Il appartient notamment au système limbique. Comme le cortex, avec lequel il est en étroite relation, c'est une structure paire présente de manière symétrique dans chaque hémisphère, dont les deux parties sont reliées entre elles par la commissure hippocampique du corps calleux. L'hippocampe joue un rôle central dans la mémoire et la navigation spatiale.

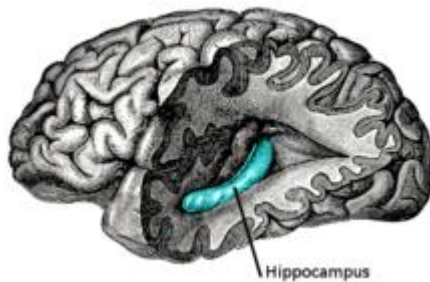


Photo 9: L'hippocampe
Source: www.fr.wikipedia.org

Les différents types de neurones de l'hippocampe sont extrêmement bien organisés, principalement sous forme de strates distinctes. C'est pourquoi, il est fréquemment utilisé comme système modèle pour étudier la neurophysiologie. Une des formes de la plasticité neuronale, connue sous le nom de LTP ou potentialisation à long terme, a été découverte et est très bien caractérisée dans cette structure.

ORGANISATION CELLULAIRE

Les cellules du système nerveux peuvent être divisées en deux grandes catégories : les cellules gliales et les neurones.

- **LES CELLULES GLIALES**

Les cellules gliales contribuent à maintenir les neurones en état d'émettre des signaux électriques. Elles sont incapables d'émettre ces signaux à cause de manque d'axone et dendrite. Par contre, elles assurent l'homéostasie du milieu immédiat entourant les neurones, contribuant au fonctionnement cérébral, en étroite synergie avec la fonction neuronale. Elles sont presque 8 à 19 fois plus nombreuses que les neurones grâce à la capacité de reproduction. On y trouve trois cellules, de morphologie et fonctions très différentes :

- Astrocytes

Leur fonction principale est de maintenir l'environnement chimique extracellulaire adéquat pour la production des signaux nerveux. Ils ont aussi le rôle d'apporter de l'oxygène et des nutriments. Les astrocytes avec des ramifications longues entourent les vaisseaux sanguins, formant une barrière qui protège le cerveau des infections : la barrière hématoencéphalique.

Ils forment aussi une sorte d'enveloppe autour des jonctions synaptiques, contribuant à réduire la diffusion des neurotransmetteurs qui ont été libérés.

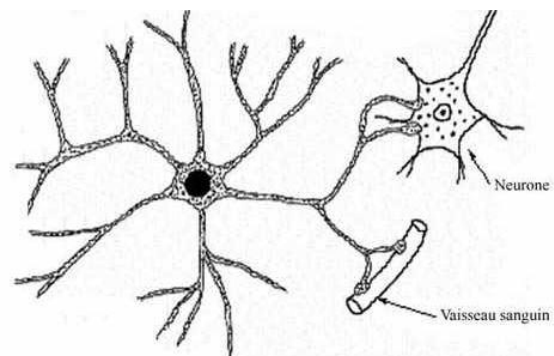


Photo 10: Astrocyte
Source: <http://science-naturalphenomena.blogspot.com.es>

- Oligodendrocytes et cellules de Schwann

Les cellules oligodendrocytes, qui se trouvent seulement dans le système nerveux central, servent à augmenter la vitesse de transmission de l'influx nerveux d'un axone. Pour cela, ces cellules entourent l'axone d'un grand nombre de neurones d'une gaine de myéline.

Les cellules de Schwann ont la même fonction que les oligodendrocytes : recouvrir les axones d'une gaine de myéline. À différence des oligodendrocytes, celles-ci n'existent qu'au niveau du système nerveux périphérique et elles sont seulement capables de former la gaine de myéline autour d'un seul axone.

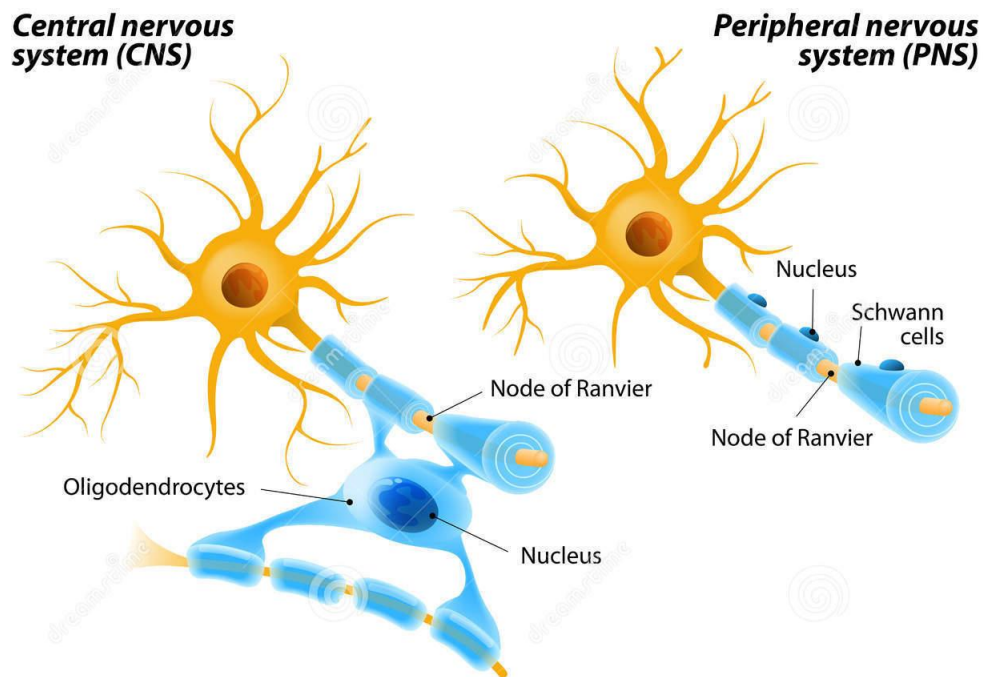


Photo 11: Oligodendrocytes et cellules de Schwann
Source: www.fr.dreamstime.com

• LES NEURONES

Un neurone est une cellule nerveuse excitable qui constitue l'unité fonctionnelle base du système nerveux. Les principales fonctions du neurone sont recevoir et intégrer l'information (influx nerveux) entrante dès les récepteurs sensitifs et dès d'autres neurones, et la transmettre à d'autres neurones ou structures pas nerveuses qui se trouvent sous le contrôle nerveux.

Ils ont aussi deux propriétés physiologiques l'excitabilité, (capacité de répondre aux stimulations et de convertir celles-ci en impulsions nerveuses) et la conductivité (la capacité de transmettre les impulsions).

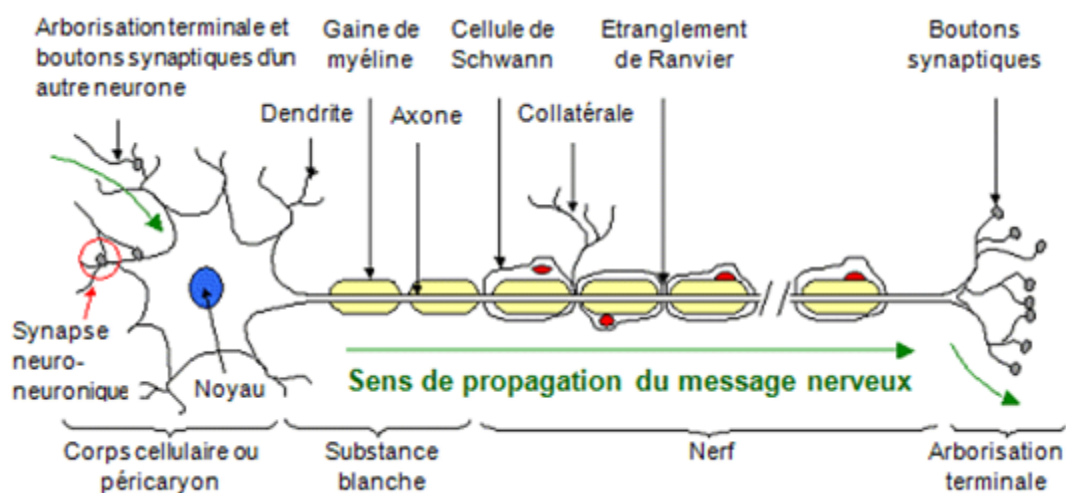


Photo 12: Structure d'un neurone
Source: www.dictionnaire-medical.net

• Types de neurones

On distingue plusieurs classifications de neurones selon :

- Distinction selon le nombre de neurites
 - 1 neurite : neurone unipolaire
 - 2 neurites neurone bipolaire
 - x neurites : neurone multipolaire

- Distinction selon leur fonction

▪ Neurones sensoriels

Le neurone sensitif ou sensoriel est situé dans un ganglion sensitif qui joue un rôle dans la perception de stimuli. Il a généralement une forme de T, à cause de la présence d'une dendrite importante et un axone. Il a un rôle très important dans le réflexe myotatique, car dans la moelle épinière possède une synapse en commun avec un motoneurone.

▪ Motoneurone

Le neurone moteur ou motoneurone est une cellule nerveuse qui est connecté au muscle et commande sa contraction. Ils contrôlent donc les mouvements corporels. Il existe 3 types de motoneurones : les α , qui innervent les fibres musculaires responsables de la contraction, les γ , qui innervent les fuseaux neuromusculaires et les β , qui innervent les deux types.

▪ Interneurone

Les interneurones se situent entre deux autres neurones pour établir le lien axonique et transmettre l'information.

- Distinction anatomique : pyramidales, en étoile, Purkinje...

• La structure du neurone

Le neurone est composé principalement d'un corps cellulaire appelé péricaryon ou soma, étant une cellule spécialisée dans la transmission de signaux. Cette spécificité se reflète sous les neurites (extensions du corps cellulaire). Comme les autres cellules, elle possède aussi une membrane neuronale et un cytosquelette. On peut observer sa structure sur la photo 12.

- La membrane neuronale : délimite le pourtour cellulaire et est constituée par de nombreuses protéines. Certaines de ces protéines agissent pour maintenir un gradient et d'autres forment les pores membranaires (qui délimitent l'entrée de substances dans le neurone).
- Le cytosquelette : toute la partie interne du neurone est formée par de microtubules et de neurofilaments. Le cytosquelette présente une flexibilité, car ces derniers éléments sont constamment régulés sous l'effet de signaux neuronaux.
- Le corps cellulaire, soma ou péricaryon : compose la partie centrale du neurone contenant le cytoplasme et le noyau. Le neurone contient les mêmes organites que ceux présents dans les cellules animales, cependant dans des proportions différentes, comme celle des mitochondries, qui permettent la production d'énergie cellulaire.
- Cellule de Schwann : recouvre les axones d'une gaine de myéline qui serve à augmenter la vitesse de propagation.
- Le nœud de Ranvier : amincissement de la gaine de myéline entourant l'axone. L'axone est protégé par une gaine de myéline, mais qui, en contrepartie, cache les canaux ioniques (petits pores transmembranaires qui sont responsables du transport des ions), et empêche la propagation de l'influx. Donc, la myéline est interrompue à certains endroits tant que l'influx nerveux se forme. Cet influx voyage de nœud en nœud, augmentant la vitesse de propagation de l'influx (conduction saltatoire).
- Neurite : prolongement du corps cellulaire neuronal. Il peut s'agir d'un axone ou d'une dendrite

- Dendrite

Les dendrites sont de fines ramifications neuronales, multiples et courtes, qui ont la fonction principale de recevoir des stimules, comme l'influx nerveux. Elles reçoivent des afférences d'autres neurones au niveau des synapses dont elles constituent l'élément post-synaptique.

Les dendrites possèdent des chimiorécepteurs qui sont capables de réagir avec les neurotransmetteurs envoyés dès les vésicules synaptiques du neurone présynaptique. C'est une partie fondamentale pour la correcte transmission des influx chimio-électriques à travers la voie nerveuse.

- L'axone ou fibre nerveuse

L'axone est le prolongement du neurone qui conduit le signal du corps cellulaire vers les zones synaptiques. Le segment initial est nommé « cône axonique » et le segment terminal, terminaison axonique ou bouton terminal. Le long de l'axone, ce signal est constitué de potentiels d'action.

- Le transport axonique

À l'intérieur de l'axone, qui est dépourvu de ribosomes, il n'y a pas de synthèse protéique : toutes les protéines doivent être formées dans le soma et ensuite être transportées jusqu'à l'extrémité de l'axone. On trouve 2 transports différents qui se produisent dans l'axone :

- Le transport antérograde : transport de vésicules du soma à l'axone nécessaires au renouvellement de la membrane de l'axone, des enzymes de synthèse ou des neurotransmetteurs libérés et le peptide (précurseur du neurotransmetteur).
- Le transport rétrograde : retour de molécules membranaires vers le soma, afin qu'elles soient dégradées.

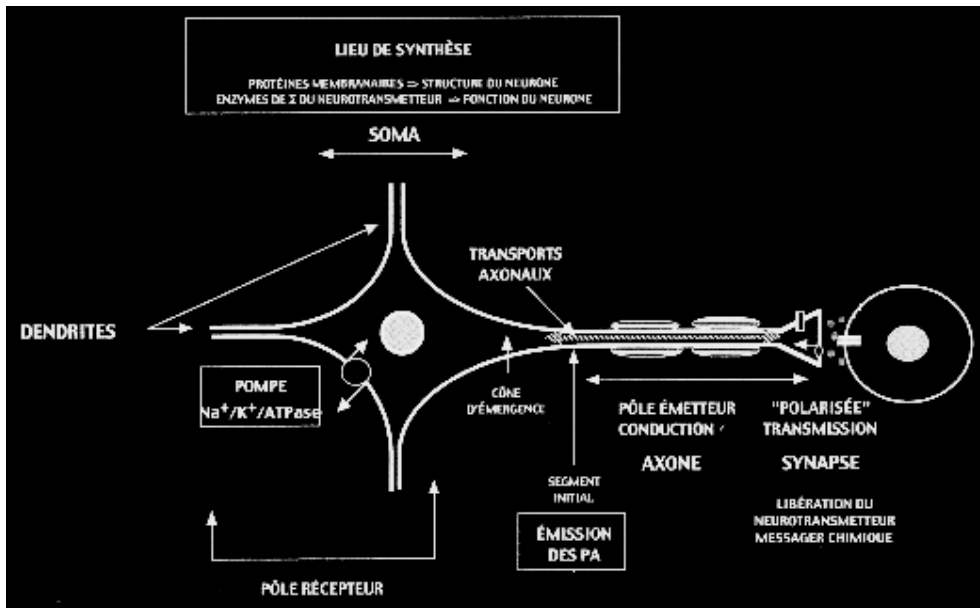


Photo 13: Transport axonique Source: <http://neurobranches.chez->

- La membrane axonique

Comme les cellules musculaires, les neurones sont des cellules capables de générer à leur surface membranaire des impulsions électriques rapides. Ces impulsions électriques sont utilisées pour transmettre des signaux le long des membranes des cellules nerveuses (et musculaires).

Une des fonctions d'une membrane neuronal, comme dans toutes les autres cellules, c'est de séparer le milieu intérieur de l'extérieur, où les différences ioniques provoquent différentes charges électriques.

L'intérieur neuronal a une charge électrique négative par rapport à l'extérieur, qui est chargé positivement à cause d'une concentration d'ions Na^+ plus élevée que dans l'intérieur, où il y a une concentration d'ions K^+ . Dans cette situation, on parle d'une membrane polarisée, car il délimite deux milieux avec des charges électriques différentes.

Si le neurone ne reçoit aucun stimule ou elle n'est pas en train de transmettre l'influx nerveux, on parle de « potentiel de repos ».

L'influx nerveux se caractérise par une modification instantanée et localisée de la perméabilité de la membrane du neurone : au moment où le neurone reçoit un stimulus, des ions sodium (Na^+) pénètrent dans la cellule en passant à travers des canaux ioniques sélectivement perméables au sodium. Le potentiel de membrane par rapport à l'extérieur prend alors une valeur positive. Ce phénomène porte le nom de « dépolarisation », et on a une nouvelle situation ionique : le potentiel d'action. Le potentiel d'action provoque la transmission de l'influx nerveux, qui se propage linéairement dans un seul sens en direction contraire au soma.

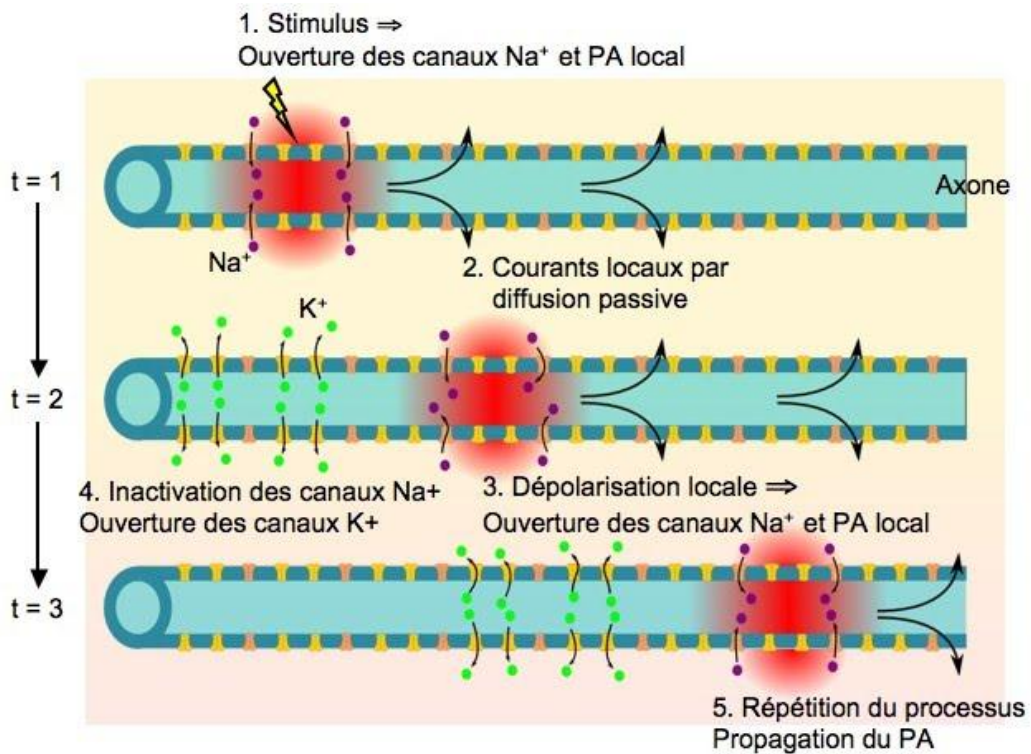


Photo 14: Transmission de l'influx nerveux Source: <https://sites.google.com/site/aphysionado/>

LA TRANSMISSION NEURONALE

- **LA TRANSMISSION SYNAPTIQUE**

C'est grâce à la transmission synaptique que l'influx électrique peut passer d'un neurone à l'autre. Les synapses représentent une zone de jonction spécialisée, située à l'endroit où la terminaison d'un axone entre en contact avec un autre neurone ou un autre type de cellule.

Les synapses comportent deux éléments distincts, l'élément présynaptique et l'élément postsynaptique, L'élément présynaptique est généralement composé d'un bouton terminal, alors que l'élément postsynaptique peut être une dendrite, le soma d'un autre neurone ou une cellule non neuronale. L'espace entre la membrane présynaptique et la membrane postsynaptique représente la fente ou l'espace synaptique.

On divise les synapses en deux grands types :

- **La synapse électrique**

Les synapses électriques sont minoritaires (1%), mais présentes dans tout le système nerveux. Elles sont des points de contact entre deux neurones qui leur

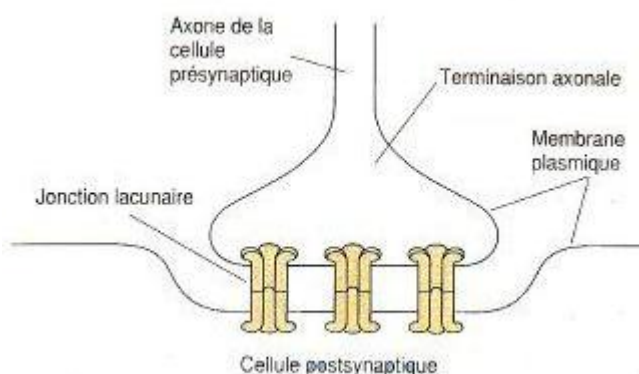


Photo 15: Synapse électrique
Source: <https://Intelligence-artificielle-tpc.fr/gd>

permettent d'échanger des ions. Elles permettent le passage direct, passif, de courants ioniques d'un neurone à l'autre par l'intermédiaire de canaux membranaires spécialisés. Avec ces synapses, les canaux ioniques

d'un canal ionique est en continuité avec le pore d'un canal ionique sur l'autre neurone. Ces canaux sont appelés jonctions communicantes. D'ailleurs, les pores formés permettent le passage des ions mais leur diamètre est suffisamment important pour laisser passer de

petites molécules organiques du cytoplasme d'une cellule au cytoplasme de l'autre.

Les jonctions communicantes forment des jonctions directes qui permettent créer une continuité électrique entre deux neurones. Celles-ci permettent une très haute vitesse de transmission, où la source de courant est souvent le courant de diffusion passive généré par le potentiel d'action, qui modifie les charges électriques des membranes pour passer d'un neurone à l'autre.

Dans la majorité des cas, la communication est bidirectionnelle. Donc, les échanges ioniques ayant lieu dans les deux sens. Lorsque deux neurones sont couplés électriquement, le PA dans le premier neurone (potentiel présynaptique) provoque un petit courant d'ions qui traverse au second neurone. Ceci crée un potentiel postsynaptique (PPS) dans le dernier neurone qui, au moment qu'il va émettre un PA, il va, en retour, affecter l'excitabilité du premier neurone et créer à son tour un PPS.

L'intérêt de ces synapses est de permettre la synchronisation de l'activité neuronale en agissant par excitation réciproque d'une part et de transmettre une information à un niveau très faible, en dessous du seuil de déclenchement des PA.

Les synapses électriques sont trouvées entre de nombreuses cellules non neuronales, comme les cellules gliales, les musculaires lisses, les cellules myocardiques...

- **La synapse chimique**

Les synapses chimiques déversent des neurotransmetteurs, substances chimiques qui sont libérées dans leur environnement par les neurones présynaptiques, comme support de la communication. Ces neurotransmetteurs vont agir sur le neurone postsynaptique pour créer des potentiels d'action.

- Etapes présynaptiques de la transmission synaptique chimique :
 1. L'activité d'un enzyme transforme des précurseurs en neurotransmetteurs. Ceux-ci sont stockés dans des vésicules synaptiques qui s'accumulent dans le bouton terminal de l'axone. (SYNTHÈSE)
 2. L'influx nerveux qui atteint le bouton terminal de l'axone provoque l'ouverture de canaux calciques sensibles au voltage.
 3. L'augmentation brutale de la concentration intracellulaire présynoptique de Ca^{2+} amène les vésicules synaptiques à se fusionner avec la membrane, libérant ainsi par un processus nommé exocytose les neurotransmetteurs à la fente synaptique. (EXCRÉTION)
 4. Après la fusion avec la membrane présynaptique, les constituants de la membrane sont recyclés dans la même terminaison afin de reconstituer de nouvelles vésicules.

- Etapes postsynaptiques de la transmission synaptique chimique :
 1. Les neurotransmetteurs se diffusent dans la fente synaptique et se lient à des récepteurs spécifiques de la membrane postsynaptique pour les activer. (FIXATION)
 2. L'activation de ces récepteurs amènera à l'ouverture de canaux ioniques qui permettront à certains ions spécifiques de traverser la membrane.
 3. Le potentiel de membrane de ce neurone est modifié en potentiel synaptique (inhibiteur or excitateur selon le type d'ion impliqué).
 4. La liaison neurotransmetteur-récepteur doit ensuite être rapidement interrompue afin de permettre la transmission d'un nouveau signal chimique en rapport avec l'arrivée de nouveaux potentiels d'action. Les neurotransmetteurs retournent alors dans la fente synaptique où ils peuvent être diffusés hors d'elle,

dégradés, ou captés pour le neurone pré-synaptique pour être recyclés

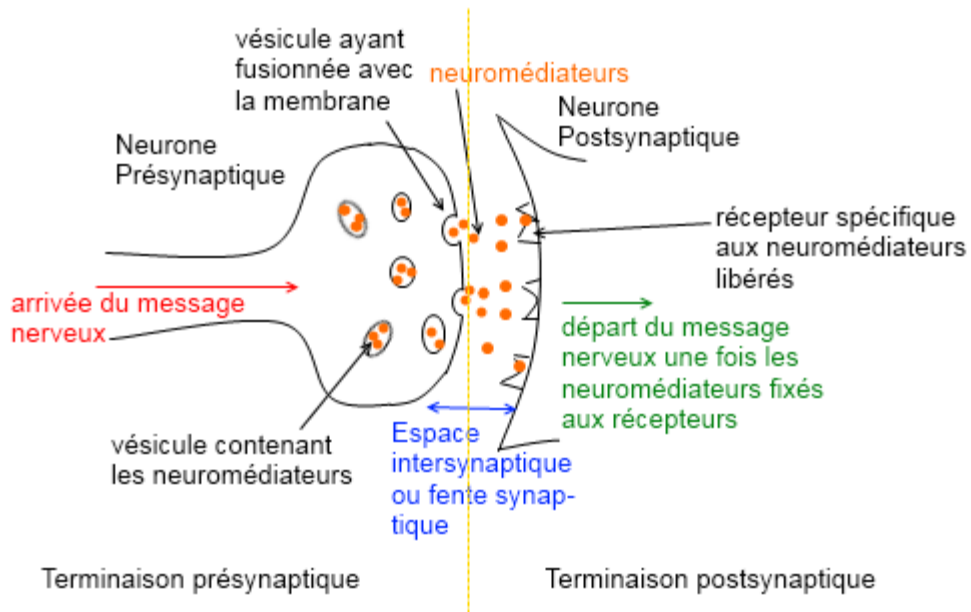


Photo 16: Synapse chimique Source: www.physique.unice.fr

• LES NEUROTRANSMETTEURS

Un neurotransmetteur est une molécule chimique libérée par neurones (ou cellules gliales) utilisé comme support de la communication neuronale. Il existe plusieurs types de neurotransmetteurs et chacun assume des fonctions précises et est libéré dans des parties spécifiques du système nerveux :

• Neurotransmetteurs à petite molécule

- Glutamate : acide aminé excitateur présent dans plus de la moitié des synapses cérébrales.
- Aspartate : acide aminé.
- Acide gamma-aminobutyrique (GABA) : acide aminé présent dans presque tous les neurones inhibiteurs.
- Glycine (Gly) : acide aminé inhibiteur, essentiellement actif dans la moelle et le tronc cérébral où elle inhibe la décharge des motoneurones.
- Acétylcholine (ACh) : amine utilisée dans les jonctions neuromusculaires périphériques, les synapses des ganglions végétatifs du SNP et dans certaines synapses centrales. Il participe à la régulation de la fréquence cardiaque du fait de sa sécrétion par le nerf vague (X).
- Monoamines : neurotransmetteur excitateur. La régulation de ce neurotransmetteur peu être perturbée dans divers troubles psychiatriques et de nombreuses drogues psychotropes (celles qui agissent sur le comportement ou sur l'humeur) affectent un ou plusieurs stades de leur synthèse, stockage ou dégradation.

- Catécholamines

Toutes les catécholamines ont un dérivé commun, la tyrosine.

- Dopamine : présente dans diverses régions du cerveau mais est surtout présente dans la substance noire qui joue un rôle important dans la motricité et la neuromodulation des comportements.
- Noradrénaline : présente dans le locus coeruleus, noyau du tronc cérébral projetant de manière diffuse sur le mésencéphale et le télencéphale. Ces neurones ont un rôle important dans la modulation du sommeil et de la veille.
- Adrénaline : présente surtout au niveau du bulbe et dans la médullosurrénale, qui la libère dans la circulation sanguine générale. L'adrénaline est sécrétée en réponse à un état de stress ou en vue d'une activité physique, entraînant une accélération du rythme cardiaque, une augmentation de la vitesse des contractions du cœur, une hausse de la pression artérielle, une dilatation des bronches ainsi que des pupilles. Elle répond à un besoin d'énergie, par exemple pour faire face au danger.

- Sérotonine

Indolamine synthétisée à partir d'un acide aminé et présente dans le système nerveux central.

- Histamine

Imidazolamine synthétisée à partir d'un acide aminé et présente en fortes concentrations dans l'hypothalamus.

- Purines

L'ATP sert de neurotransmetteur excitateur dans le SNP, dans la corne dorsale de la moelle et dans un sous-ensemble de neurones hippocampiques.

- **Neuropeptides**

Ces neurotransmetteurs sont souvent co-libérés avec des neurotransmetteurs à petite molécule. Quelques exemples de neuropeptides :

- Peptides opioïdes : constitué d'une chaîne d'acides aminés, ils sont très impliqués dans les mécanismes de la réponse immunitaire humaine.
- Substance P : présente dans le système nerveux central, ce neurotransmetteur est associé à la régulation des troubles de l'humeur, de l'anxiété², du rythme respiratoire, des nausées et de la douleur.
- Neuropeptide Y : participe à la régulation du comportement alimentaire au niveau hypothalamique et au contrôle nociceptif au niveau spinal.

MUSIQUE ET CERVEAU

La musique est l'une des activités qui produise plus d'émotions dans l'être humain. C'est à cause de ceci que l'interconnexion avec elle et l'humanité est visible pendant toute l'histoire. La musique est si puissante qu'elle peut être capable de changer l'humeur d'une personne et d'avoir une réponse physique chez la personne que l'attend.

Toutes ces réponses sont remarquables au niveau physique avec la dilatation des pupilles, l'hausse de pression artérielle, le rythme cardiaque... Mais pour que cela arrive, il faut avoir d'avance une réponse cérébrale.

• LE TRAITEMENT CÉRÉBRALE DE LA MUSIQUE

Les progrès de l'imagerie médicale dans les années 1980 ont fait possible l'utilisation de technique permettant l'observation directe du cerveau, comme l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) la magnétoencéphalographies (MEG), l'électroencéphalographie (EEG) et la tomographie par émission de positrons (PET).

Joseph Gall, neurologue allemand, élaborait la théorie de la phrénologie, c'est-à-dire la localisation des fonctions cérébrales dans le cerveau. Il est le premier à affirmer qu'il y a des zones cérébrales ayant des fonctions précises. La musique était alors située dans l'hémisphère droit, avec l'imagination, l'orientation spatiale, entre d'autres, pendant que le langage était plutôt situé à l'hémisphère gauche, notamment à l'aire de Broca. Mais c'est en réalité plus compliqué ; les deux hémisphères sont sollicités par le langage et la musique. Pour cette dernière, l'hémisphère droit a un rapport avec l'analyse du ton et du timbre pendant que l'hémisphère gauche a un rapport avec le rythme et la reconnaissance des mélodies, tous les deux indispensables pour comprendre la musique, comme on vient de démontrer.

Donc, avec les dernières techniques nommées, les neuroscientifiques ont fait immenses avances pour comprendre comment notre cerveau fonctionne. Quand une personne est connecte à ces machines en faisant une activité concrète, comme lire ou résoudre un problème mathématique, certaines aires du cerveau s'activent. Ces observations cliniques en neurologie révèlent que lorsque le cerveau perçoit de la musique, ce n'est pas une zone spécifique qui s'active, comme on a déjà dit. Ses dernières techniques mentionnées peuvent nous montrer l'activation de plusieurs aires cérébrales, phénomène que rappelle à « un feu d'artifice » qui embrasse tout le cerveau. Ceci peut arriver dans beaucoup de combinassions possibles et de façon simultanée.

La complexité du retraitement qui est mené par un musicien entraîné constitue un engrais de processus qui permanassent encore extrêmement confus. Il n'y a guère plus d'une trentaine de spécialistes dans le monde qui étudient les rapports du cerveau et de la musique. De plus, il existe une grande variété d'habiletés auditives dans la population musicale, ainsi comme la complexité dans les tâches qui mènent à terme les différents individus impliqués dans le phénomène musical : l'interprète, l'auditeur, le compositeur... Le problème de ce méconnaissent est aussi porté par l'échec à trouver de musiciens qui ont eu des dommages cérébrales.

Même avec toutes ces complications, d'après études de neuroscience cognitive de la musique, on peut établir des bases neurologiques pour déterminer les différentes zones activées par la musique qui la traitent pour après l'unifier dans une expérience musicale:

À l'oreille externe, composée par le pavillon et le conduit auditif, les ondes sonores sont captées et conduites par le conduit auditif jusqu'à l'oreille moyenne. Arrivée dans ce point, le tympan de l'oreille vibre et le son arrive à la cochlée résonne, provoquant que les cellules ciliées de la cochlée libèrent un neurotransmetteur qui provoque des potentiels d'action tout au long du nerf auditif. Le nerf auditif conduit ensuite à plusieurs couches de synapses à de nombreux noyaux dans le tronc cérébral. Le cerveau est capable de traiter le son séparant des éléments comme la mélodie et le rythme pour les pouvoir comprendre et par la suite, les réassembler, en une fraction de seconde.

- **Le traitement cérébral chez l'auditeur**

- Le ton

Chez la cochlée, les parties successives de la membrane basilaire, organisée par tonotopie, résonnent (selon la fréquence du ton) et transmettent des potentiels d'action que codifient les fréquences du son d'une façon particulière et ils déterminent l'arrivée d'un stimulus sonore au cortex.

- Le traitement de la mélodie

Des études réalisées pour Brattico, Tervaniemi, Naatanen et Peretz l'année 2006 suggèrent que les individus sont capables de détecter automatiquement une différence ou une anomalie dans une mélodie, et que ce processus est mené dans le cortex auditif, plus précisément dans le lobe supratemporal (cortex auditif secondaire). Ces découvertes suggèrent qu'il existe une comparaison automatique des informations, comme les règles musicales influencées culturellement (progression d'accords) et les attentes individuelles de la façon dont la mélodie devrait procéder.

Avec ceci Kinser conclut que le lobe temporal traite de la reconnaissance et de la perception des stimuli auditifs, de la mémoire et de la parole. Ecouter une musique et traiter ses structures impliquent des régions qui participent aussi au langage, telles les aires de Broca et de Wernicke, ainsi que d'autres régions du cortex temporal.

Beaucoup d'études en neuroimagerie ont trouvé des preuves de l'importance des régions auditives secondaires droites dans les aspects du traitement de hauteur musicale, comme la mélodie.

- Le rythme

La surface supérieure du lobe temporal de l'hémisphère droit est impliquée dans le traitement du rythme. Des études montrent une activation du cortex frontal gauche, le cortex pariétal gauche et le cervelet lorsqu'un individu s'apprête à réaliser un rythme d'intervalles régulier comme par exemple, battre

la mesure avec le pied, qui nécessite une synchronisation temporelle et implique le cervelet et les cortex moteur et frontal.

- La tonalité

La tonalité décrit les relations entre les éléments de la mélodie et de l'harmonie (les tons, les intervalles, les accords et les échelles). Dans un sens conventionnel, la tonalité se réfère aux types d'échelles majeur et mineur.

Le cortex auditif droit est principalement impliqué dans la perception du ton et des parties de l'harmonie, de la mélodie et du rythme.

Une étude de Petr Janata a trouvé qu'il y a des zones sensibles à la tonalité dans le cortex préfrontal médial, le cervelet, les sillons temporaux supérieurs des deux hémisphères et gyrus temporal supérieur.

- Interaction audio-motrice de commande prédictive

Les interactions audio-motrices sont tout engagement ou communication entre deux systèmes. Quand l'auditeur entend une musique il peut se produire une interaction de commande prédictive. Dans la commande prédictive est principalement le système auditif qui influence la création de mouvement, comme le phénomène de tapoter sur le rythme, où l'auditeur anticipe les accents rythmiques.

- Les émotions

Les émotions induites par la musique activent des régions cérébrales frontales similaires à celles provoquées par d'autres stimuli. Les segments musicaux que l'individu reçoit comme heureux et joyeux ont été associés aux augmentations de l'activité (EEG) gauche frontale pendant que les segments musicaux considérés comme tristes ou craintifs sont associés aux augmentations de l'activité (EEG) frontale droite. Cependant, lorsque des mélodies désagréables pour l'auditeur sont jouées le cortex cingulaire postérieur s'active ; ceci indique un sentiment de conflit ou de douleur émotionnel. L'activité globale de la région augmentait à mesure que les stimuli musicaux affectifs devaient plus intenses.

La musique est capable de créer une expérience très agréable qui est décrite comme à « frissons ». D'après une étude réalisée par Blood et Zatorre en 2001 pour mesurer les changements du flux sanguin au cerveau dûs aux « frissons » lorsque les participants écoutaient une musique concrète, on peut constater qu'à mesure que ces « frissons » s'intensifiaient, le flux sanguin des zones cérébrales comme l'amygdale, le cortex orbitofrontal, le striatum ventral, le mésencéphale et le cortex préfrontal médial ventral subit des nombreux changements.

- **Le traitement cérébral chez le musicien**

Pendant la performance musicale il y a une implication plus complète de toute l'activité expliquée antérieurement à cause d'une habilité musicale plus développée. Mais le musicien doit aussi utiliser autres parties cérébrales pour pouvoir mener à bien sa performance.

Même si ces fonctions et leurs mécanismes ont été étudiés séparément dans de nombreuses études, on connaît très peu sur leur interaction combinée dans la production d'une performance musicale complexe.

- Le timing

La capacité à exprimer des mouvements dans un temps précis a été accréditée par un métronome, où le temps est représenté par des oscillations ou des impulsions.

Des études de neuroimagerie fonctionnelle et des études sur des patients cérébro-lésés associent la synchronisation du mouvement au cervelet, aux ganglions de la base (noyaux gris centraux) et à la région motrice supplémentaire. Ces résultats indiquent donc que la synchronisation est contrôlée par un réseau de régions qui contrôlent des paramètres de mouvement spécifiques et qui dépendent de l'échelle de temps pertinente de la séquence rythmique.

- Le séquençage

Le séquençage des moteurs a été investigué par mouvements individuels, tels que les séquences de doigts où la coordination des sous-composants de mouvements multi-articulaires complexes.

D'après ces études, on constate l'implication des régions corticales et sous corticales et ganglions de la base, la région motrice et prémotrice supplémentaire, le cervelet et les cortex prémoteur et préfrontal. Tous ces derniers nommés sont impliqués dans la production et l'apprentissage des séquences motrices, mais sans preuve explicite de leurs contributions ou interactions entre eux.

- L'organisation spatiale

Les performances musicales d'experts n'exigent seulement un séquençage précis mais aussi une organisation spatiale des mouvements. Des études ont établi l'implication des cortex pariétal, sensori-moteur et prémoteur dans le contrôle des mouvements, lorsque l'intégration de l'information spatiale, sensorielle et motrice est requise.

- L'improvisation

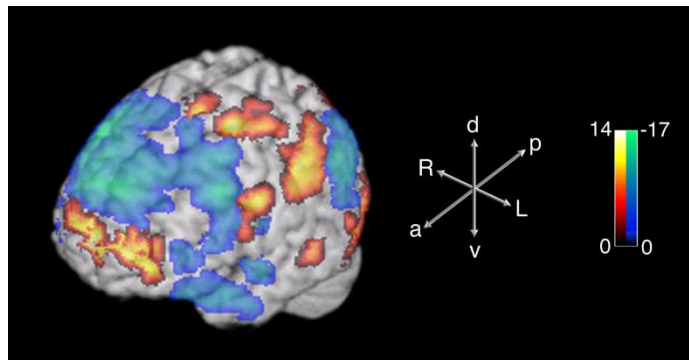
La créativité est une caractéristique essentielle du comportement chez l'être humain. La performance musicale spontanée, soit chantant, soit jouant d'un instrument, peut être définie comme l'improvisation en ligne d'éléments musicaux mélodiques, harmoniques et rythmiques dans un contexte musicale pertinent.

Une étude publiée en 2008 étudiait le cerveau d'un musicien lequel, lors d'une performance de jazz, devait créer un solo en utilisant l'structure d'accords et la mélodie d'une composition comme cadre de base contextuel. Donc, le solo improvisé n'était jamais pareil. Cette étude utilisant l'IRM fonctionnelle pour étudier l'improvisation (qui est la marque fabrique du jazz), montre des changements distinctifs cérébraux : l'activation médiale du cortex préfrontal (qui est associé avec la production de récits autobiographiques), la désactivation du

cortex préfrontal dorsolateral (son but principale est de motoriser, évaluer et corriger sciemment le comportement) et l'activation sensomotrice, comme on peut voir sur la photo 17.

Photo 17: projection tridimensionnel des activations et désactivations associés à l'improvisation pendant le paradigme du jazz.

Source: <http://journals.plos.org/plosone>



- L'interaction audio-motrice de rétroaction

Dans la performance, on trouve des interactions de rétroaction car le ton est variable et doit être continument contrôlé. Si cette interaction est bloquée, le musicien peut continuer à exécuter des morceaux, mais plusieurs aspects expressifs peuvent être affectés.

Au moment où se produisent des retards ou distorsions, la performance motrice est altérée. L'interaction de rétroaction asynchrone perturbe le timing des éléments, tandis que l'altération des informations de hauteur perturbe la sélection des actions appropriées, mais non leur timing. Cela suggère que les perturbations se produisent car les deux actions et les percepts dépendent d'une seule représentation mentale sous-jacente

- La mémoire

L'année 2012 Groussard et *al.* réalisaient une étude où ils comparaient la mémoire des mélodies familières et non familières entre musiciens et non-musiciens, ainsi comme les zones activées. Les résultats montrent des différences fonctionnelles entre le souvenir des non-musiciens et musiciens. Pour ce dernier, la reconnaissance de mélodies connues implique une activation de la mémoire sémantique mais aussi une corrélation avec la mémoire épisodique des mélodies traitées. Autrement dit, quand les musiciens

étendaient des mélodies familières, des détails perceptuels et contextuelles s'activaient dans leur ment, en créant une relation entre la mélodie et les mémoires autobiographiques.

- **PLASTICITÉ CÉRÉBRALE**

Jouer d'un instrument musicale implique l'activation de presque toutes les aires cérébrales à la fois, en spéciale le cortex visuel, le cortex auditif et le cortex moteur. Se convertir en un musicien habile requiert d'un grand entraînement, et le type d'apprentissage qu'implique comporte le développement d'une grande quantité de facultés. Ces habilités induisent connexions et interactions entre différentes aires cérébrales. La discipline et la constance pour jouer d'un instrument renforcent les fonctions cérébrales, qui nous permettent donc appliquer cette amélioration dans d'autres activités.

D'après le dernier point, on peut constater que la différence la plus notable entre entendre la musique et la jouer est que ce dernier exige de compétences motrices plus raffinées que sont contrôlées par les deux hémisphères du cerveau, telles comme la précision (principalement à l'hémisphère gauche) et la création de contenu (hémisphère droit).

- **Les différences anatomiques entre le cerveau d'un musicien et le cerveau d'un non-musicien**

« Les anatomistes seraient bien en peine d'identifier le cerveau d'un artiste plasticien, d'un écrivain ou d'un mathématicien. Mais il reconnaîtraient le cerveau d'un musicien professionnel sans la moindre hésitation »

Olivier Sacks, Neurologue.

Plusieurs études ont étudié les différences entre le cerveau d'un musicien avec celui d'un non-musicien. La pratique répétée et l'entraînement musical induisent différences structurales cérébraux :

- Le corps calleux (CC)

Le corps calleux, la principale fibre interhémisphérique, a un rôle extrêmement relevant dans l'intégration et la communication entre les hémisphères cérébrales. L'imagerie *in-vivo* a montré que des augmentations de la taille du CC peuvent être observées avec un maximum pendant la décennie de l'individu. Cette progression présumée de la maturation du CC peut aussi correspondre à une période de plasticité corticale puisque des modifications continues de la densité synaptique corticale se produisent tout au long de l'enfance.

L'étude « *Increased corpus callosum size in musicians* » reçue en 1994 et acceptée en 1995, examine 30 musiciens professionnels (claviéristes et ceux qui jouent des instruments à cordes) droitiers et les compare à 30 sujets avec aucun entraînement musical (la plus part étant des étudiants de médecine), utilisant résonance magnétique *in-vivo*.

Cette étude révèle une différence significative en l'anatomie du corps calleux, concrètement dans la partie antérieure et régions postérieures.

	Women (n)	Men (n)	Age range (years)	Mean age ± S.D. (years)	Mean body height/ S.D. (cm)
All musicians (n = 30)	8	22	21–36	26.1 ± 3.8	179.5 ± 9.6
Musicians with commencement of training < 7 years of age (n = 21)	6	15	21–36	25.6 ± 3.7	178.9 ± 10.6
Musicians with commencement of training ≥ 7 years of age (n = 9)	2	7	21–34	27.4 ± 3.9	180.9 ± 6.7
Controls (n = 30)	8	22	21–38	26.5 ± 4.6	178.6 ± 6.8

Tableau 1 : distribution selon le sexe, l'âge et la taille des groupes de sujets étudiés
Source : étude « *Increased corpus callosum size in musicians* »

	Total CC area	Anterior half of CC area*	Posterior half of CC area†
All musicians (n = 30)	687 ± 85	371 ± 46	314 ± 43
Musicians with commencement of training < 7 years of age (n = 21)	709 ± 81	384 ± 42	321 ± 44
Musicians with commencement of training ≥ 7 years of age (n = 9)	637 ± 77	340 ± 43	297 ± 38
Controls (n = 30)	649 ± 88	344 ± 48	305 ± 43

*Significant differences are those between controls and all musicians, between controls and musicians with early commencement of musical training, as well as between the two subgroups of musicians with or without early commencement (see Results).

†No significant differences (see Results).

Tableau 2 : Mesure de la zone sagittale médiane du corps calleux pour les sujets décrits sur la table 1 en mm²
Source : étude « *Increased corpus callosum size in musicians* »

- Planum temporale

L'année 2003, Christian Gaser et Gottfried Schlaug ont réalisé une étude en appliquant une méthode optimisée de morphométrie voxel-basée (VBM) basée sur une comparaison de 20 musiciens professionnels masculins et 20 musiciens amateurs masculins avec un groupe de 40 hommes non musiciens d'entre 18 et 40 ans dont tous étaient claviéristes.

La division entre musiciens était réalisée selon ce critère :

- Le musicien professionnel était défini comme concertiste, des professeurs de musique à temps complète ou des étudiants de conservatoire ayant une pratique moyenne d'au moins 1 heure.
- Les musiciens amateurs étaient définis comme ceux qui jouaient régulièrement un instrument mais dont la profession se situait en dehors du domaine de la musique.

Cette étude montre des corrélations positives entre le statut de musicien et volume de matière grise dans les zones du corps calleux, plus concrètement dans la zone motrice et somatosensorielle primaire, le cortex prémoteur, la zone antérieure pariétale supérieure et dans la zone inférieure du gyrus temporal bilatérale.

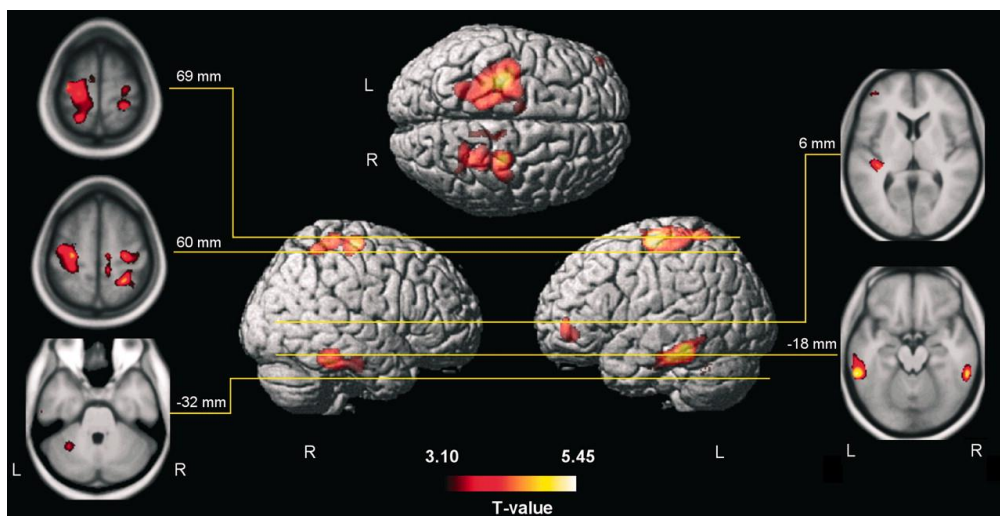


Photo 18 : régions cérébrales avec différences de matière grise entre musiciens professionnels, musiciens amateurs et non musiciens. Les lignes jaunes indiquent les coupes sélectionnées.

Source : étude « *Brain structures differ between musicians and non-musicians* »

- Aire anteromediale du gyrus de Heschl

L'étude intitulé « *Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians* » qui compare le traitement de tons sinusoïdaux dans le cortex auditif de 12 non-musiciens, 12 musiciens professionnels et 13 musiciens amateurs, montre comme un de ses résultats un 130% de plus de matière grise chez l'aire anteromediale du gyrus de Heschl, (circonvolution cérébrale du lobe temporal du cortex cérébral qui contient l'aire auditive primaire) chez les musiciens professionnels comparés à les non-musiciens, comme on peut remarquer sur le suivant tableau :

Area	Side	Gray matter volume (mm ³)			White matter volume (mm ³)		
		Non-musicians	Professional musicians	Amateur musicians	Non-musicians	Professional musicians	Amateur musicians
HG	L	2,083 ± 212	2,607 ± 215	2,694 ± 411	929 ± 72	861 ± 128	883 ± 116
	R	1,868 ± 110	2,814 ± 197**	2,256 ± 256	946 ± 90	1,172 ± 165	1,018 ± 188
	(L+R)/2	1,976 ± 153	2,710 ± 201**	2,475 ± 308	937 ± 52	1,018 ± 132	951 ± 144
	δ_{HG}	-0.11 ± 0.06	0.08 ± 0.04	-0.18 ± 0.10	0.02 ± 0.09	0.31 ± 0.12*	0.22 ± 0.10
aHG	L	925 ± 107	1,513 ± 115**	1,435 ± 181*	434 ± 44	516 ± 56	504 ± 82
	R	824 ± 57	1,406 ± 142**	1,379 ± 170**	353 ± 46	484 ± 65	453 ± 50
	(L+R)/2	873 ± 77	1,461 ± 112***	1,407 ± 138**	394 ± 39	505 ± 48	502 ± 59
	δ_{aHG}	-0.11 ± 0.07	-0.07 ± 0.09	-0.04 ± 0.11	-0.21 ± 0.13	-0.06 ± 0.15	-0.11 ± 0.18
amHG	L	328 ± 58	776 ± 68***	523 ± 57*	176 ± 18	220 ± 27	246 ± 35
	R	296 ± 31	659 ± 39***	448 ± 47*	160 ± 22	227 ± 27	208 ± 26
	(L+R)/2	311 ± 27	716 ± 39***	494 ± 46**	172 ± 15	223 ± 18*	227 ± 28
	δ_{amHG}	-0.10 ± 0.12	-0.16 ± 0.10	-0.15 ± 0.11	-0.09 ± 0.13	0.03 ± 0.18	-0.16 ± 0.15

*P < 0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001 (ANOVA, professionals/amateurs versus non-musicians). Values given as mean ± s.e.m. δ , hemispheric asymmetry (Methods).

Tableau 3: Volumétrie du gyrus de Heschl

Source: étude « *Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians* »

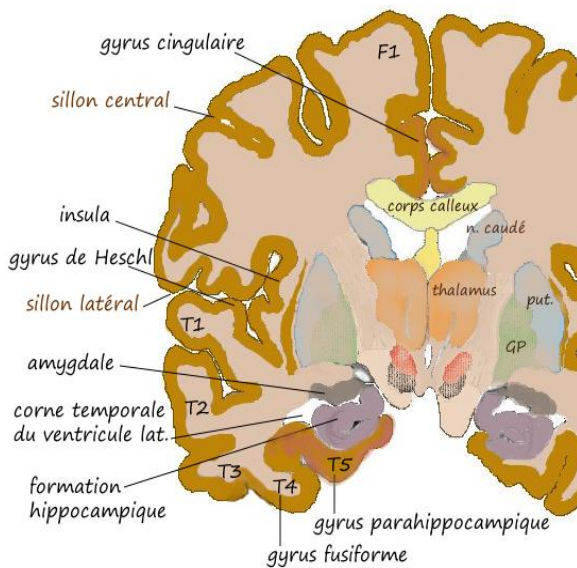


Photo 19: Situation du gyrus de Heschl
Source: www.fr.wikipedia.org

- **Les effets cognitifs de la pratique musicale**

Comme on a remarqué pendant les derniers points, jouer un instrument de musique implique plusieurs aptitudes, telles que l'auditive et la motrice. Dans le point antérieur on prouve l'augmentation de la substance grise dans différentes zones cérébraux. Mais cela a aussi un effet cognitif : la musique est une activité cognitive complexe qui peut faire progresser des sphères de la cognition qui ne lui semblent pas directement reliées.

- Les habilités langagières

Les résultats d'une étude de Dick et al. ont montré que des aires cérébrales classiquement dédiées au traitement du langage (planum temporale gauche, sulcus temporal supérieur bilatéral et du gyrus temporal antérieur supérieur gauche) répondent également à la musique seulement chez les sujets adultes musiciens. Ces régions sont en fait spécialisées dans toutes formes d'expertise auditivomotrice : elles représentent certainement une part des soubassements anatomiques qui expliquent le transfert cognitif entre pratique musicale et habiletés langagières diverses.

Cette étude peut être corroborée par autres études telles que le travail à Marin, qui montre que les enfants qui ont suivi des leçons de musique réussissent significativement mieux les tests de langage, en particulière la formation de règles morphologiques.

- Les habilités visuospatiales

Selon certains auteurs, il existe une relation entre musique et cognition spatiale, car les réseaux neuronaux recrutés pour ces deux habilités se recouvrent. L'aire de Broca (une des zones principalement liées au traitement du langage) au niveau du gyrus frontale inférieur pourrait être une des régions communes.

L'amélioration de ces habilités a été prouvée en réalisant des tâches de comparaison de colonnes de lettres et de chiffres, et aussi avec la détection d'un élément dans une figure complexe. La meilleure représentation du champ visuel serait donc due à la lecture habituelle des partitions.

- Le raisonnement non-verbal

Des études réalisées aux enfants comme par exemple à partir du subtest « *Bead memory* » de l'échelle d'intelligence de Stanford-Binet, montrent que seuls des enfants assignés à des leçons de musique progressent aux épreuves qui font intervenir les aptitudes de raisonnement spatio-temporel.

D'ailleurs, il semble que l'apprentissage des mathématiques à l'école est plus facile pour des enfants qui ont suivi des cours de musique. Selon Bolduc, l'organisation rythmique de la musique contribuerait à une meilleure maîtrise des notions de fractions.

- La mémoire épisodique

La mémoire épisodique est une forme de mémoire à long terme déclarative spécialement dédiée aux souvenirs précis des événements passés avec leur contexte temporel, spatial et émotionnel.

L'étude de Groussard et *al.* montre une augmentation de la densité de la matière grise au niveau de l'hippocampe gauche chez les musiciens, aire particulièrement importante pour la mémoire épisodique verbale et autobiographique. Ceci peut être vérifié grâce à l'étude de Huang et *al.* qui montre que les musiciens ont des meilleures performances en mémoire épisodique que les non-musiciens.

- Mémoire de travail

La mémoire de travail est un modèle de fonctionnement de la mémoire à court terme introduit par Alan Baddeley et Hitch l'année 1974. Ce modèle décrit la mémoire temporelle modulaire ; la mémoire entre dans un module où un traitement y est fait et l'information en sort. La mémoire de travail est donc un modèle de la mémoire à court terme ou celle-ci est exposée, communément comme permettant un maintien temporaire de l'information mais aussi avec la manipulation de l'information maintenue.

Les composants du modèle de Baddeley et Hitch sont :

- La boucle phonologique (BP) : elle est capable de retenir et de manipuler des informations sous forme phonologique.
- Le calepin visuo-spatial (CVS) : il est chargé des informations codées sous forme visuelle.
- L'administrateur central : mécanisme attentionnel de contrôle et de coordination des systèmes esclaves (boucle phonologique et calepin visuo-spatial). Il intègre les informations issues des deux sous-systèmes et les met en relation avec les connaissances conservées en mémoire à long terme.
- Le tampon (ou *buffer*) épisodique. C'est au niveau de ce tampon que l'administrateur central peut regrouper les informations issues des impressions sensibles (des sous-systèmes) et de la mémoire à long terme.

Elle a une capacité limitée : elle ne peut traiter que sept informations isolées en même temps et sa durée est limitée à quelques secondes. L'information stockée permet de réaliser rapidement la tâche souhaitée suivante, et est sensible à tous les éléments distracteurs.

L'étude de S. M. Courtney et *al.* intitulée « *The role of prefrontal cortex in working memory : examining the contents of consciousness* » montre à travers de la mesure de le fluxe de sang cérébrale que l'aire gauche et droite du cortex préfrontale est activé pendant la réalisation des activités qui utilisent la mémoire du travail.

- Mémoire de travail et musique

Pour comprendre comment la musique est traitée dans la mémoire de travail, plusieurs études se sont réalisées. La première approche est basée sur la confusion acoustique, étude de Conrad qui montre que des séquences de lettres ou de mots rythmiques (B, V, E, G, C) sont plus difficiles à rappeler que les séquences dissemblables (F, K, L, R, X), faute de la confusion acoustique.

Plus tard, Williamson et *al.* ont investigué si la mémoire musicale à court terme pouvait être confondue de la même manière en se posant la question de si une mélodie basée sur des sons rapprochés est plus difficile à rappeler qu'une mélodie qui saute. Les résultats montrent la proximité de la hauteur n'a eu aucun effet sur le rappel chez les musiciens, tandis que cette confusion acoustique ait été reproduite chez les non-musiciens.

De plus, l'étude de Schulze et *al.*, utilisant L'IRMf, montre que les mêmes structures centrales du cerveau sont impliquées à la fois dans la mémoire de travail verbale et tonale, mais que des zones discrètes supplémentaires sont activées par la mémoire de travail verbale ou tonale chez les musiciens entraînés. Cela suggère l'existence de deux systèmes séparés mais très imbriqués de mémoire tonale et verbale chez les musiciens, créés par l'apprentissage musical. Sans surprise, les musiciens étaient significativement meilleurs pour rappeler des mélodies que les non-musiciens, bien que les deux groupes se soient aussi bien comportés lors du rappel verbal.

TRAVAIL PRATIQUE

Le travail pratique réalisé est fondé sur une comparaison des résultats obtenus d'entre 50 élèves d'entre 16-17 ans, 25 étant étudiants scolarisés et 25 étant étudiants scolarisés et étudiants de musique au moins avec le niveau élémentaire, à partir de la réalisation de l'épreuve d'attention et de mémoire de travail du test WAIS-IV (*Wechsler Adult Intelligence Scale*), test conçu pour mesurer l'intelligence des adultes (plus de 16 ans).

L'objectif de cette partie pratique est démontrer que les élèves étudiants de musique ont une meilleure attention et une mémoire de travail auditive respecte aux autres.

Le test réalisé s'agit de la partie de digits du test WAIS-IV, en concrète deux subdivisions de cette catégorie : le test d'attention et le test de mémoire de travail. La méthodologie pour réaliser chaque test est la suivante :

- **Le test d'attention**

Le test d'attention est basé sur la répétition d'une séquence numérique dictée par le réalisateur du test, qui doit être répétée de façon directe, c'est-à-dire : l'individu qui réalise le test doit répondre dans le même ordre qu'il a entendu.

Le test a 8 subdivisions, dans lesquelles il y a 2 séquences de numéros.

Les numéros doivent être dictés à la vitesse d'un numéro par seconde. Au moment où le réalisateur finit de répéter la séquence, l'individu n'a pas besoin de répondre aussitôt à celle-ci, il a le droit à répondre quand il sera prêt et à la vitesse souhaité par lui-même.

Le réalisateur du test doit écrire la séquence répétée par l'individu et la comparer à celle qu'il a écrite. Si elle est correcte, l'individu aura 1 point. Au contraire, l'individu aura 0 points. Si l'individu se trompe deux fois dans la même séquence, le test doit s'arrêter et l'individu aura sa

ponctuation finale. Celle-ci dépendra de la quantité de numéros que l'individu a bien répétés, ayant un résultat minimum de 0 et un résultat maximum de 9.

- **Mémoire de travail (auditive)**

Le test de mémoire de travail est basé sur la répétition d'une séquence numérique dictée par le réalisateur du test, qui doit être répétée de mode indirecte, c'est-à-dire : l'individu qui réalise le test doit répéter la séquence numérique de façon inverse.

Le test a 8 subdivisions, dans lesquelles il y a 2 séquences de numéros.

Les numéros doivent être dictés à la vitesse d'un numéro par seconde. Au moment où le réalisateur finit de répéter la séquence, l'individu n'a pas besoin de répondre aussitôt à celle-ci, il a le droit à répondre quand il sera prêt et à la vitesse souhaité par lui-même.

Le réalisateur du test doit écrire la séquence inverse répétée par l'individu et la comparer à celle qu'il a écrite. Si elle est correcte, l'individu aura 1 point. Au contraire, l'individu aura 0 points. Si l'individu se trompe deux fois dans la même séquence, le test doit s'arrêter et l'individu aura sa ponctuation finale. Celle-ci dépendra de la quantité de numéros que l'individu a bien répétés, ayant un résultat minimum de 0 et un résultat maximum de 8.

L'individu doit être tout seul, sans personne présente et sans ne pas pouvoir regarder la feuille pour éviter des distractions.

Le résultat obtenu des testes est calculé à partir de la formule suivante :

$$\frac{\text{Ponctioation directe} * -\text{Moyenne} *}{\text{Desviation tipique (Dt) *}} \times 10 + 50 = \text{PT}$$

*Informations obtenues à partir du tableau de barème situé à la page 1 de l'annexe

Les résultats seront classifiés selon le tableau suivant, qui montre l'ensemble de ponctuations que peuvent être obtenues :

PT (Typiques) $\bar{X}= 50$ Ds/dt = 10	PT (ponctuation)	
	> 70	Supérieur
	> 60	Normal haut
	50 \pm 10	Normal
	< 40	Altéré
	40-30	Légèrement altéré
	30-20	Modérément altéré
	< 20	Critique

Tableau 4: Classification des ponctuations

Et donc on peut établir :

Mémoire de travail (SpanID)

SpanID	PT (Typique)	Classification
8	81	Supérieur
7	71	Supérieur
6	61	Normal haut
5	51	Normal
4	41	Normal
3	31	Légèrement altéré
2	21	Modérément altéré
1	11	Critique

Tableau 5: Classification des ponctuations SpanID

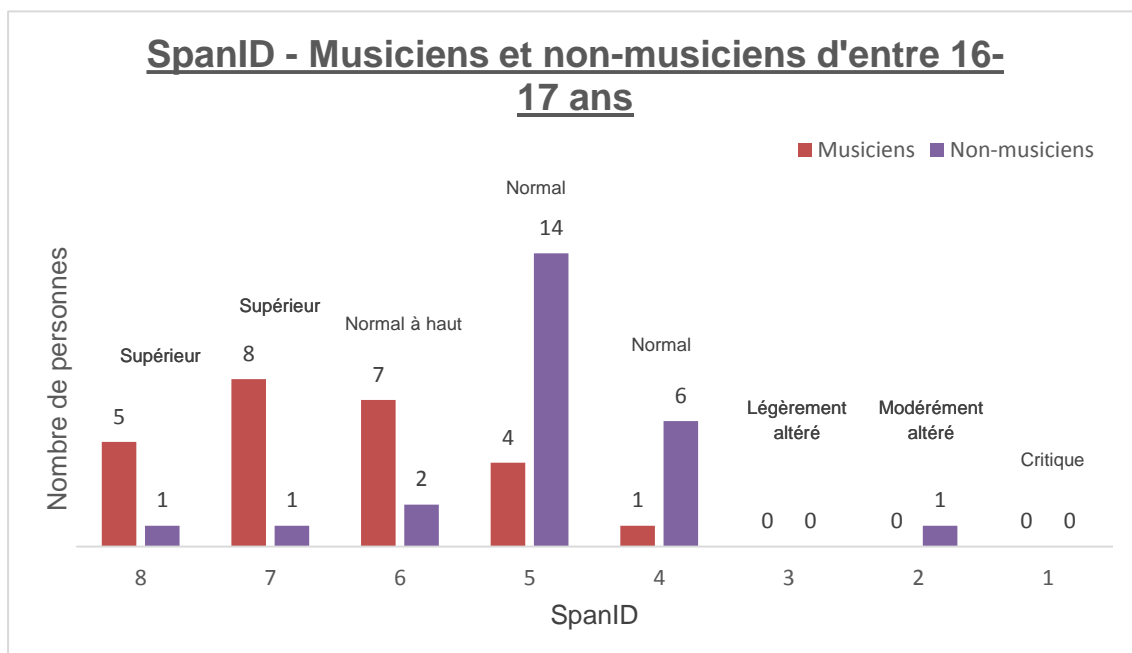
Attention (SpanDD)

SpanDD	PT (Typique)	Classification
9	74,5	Supérieur
8	65,5	Normal haut
7	56,4	Normal
6	47,3	Normal
5	38,2	Légèrement altéré
4	29,1	Modérément altéré
3	20	Modérément altéré
2	10,9	Critique
1	1,82	Critique

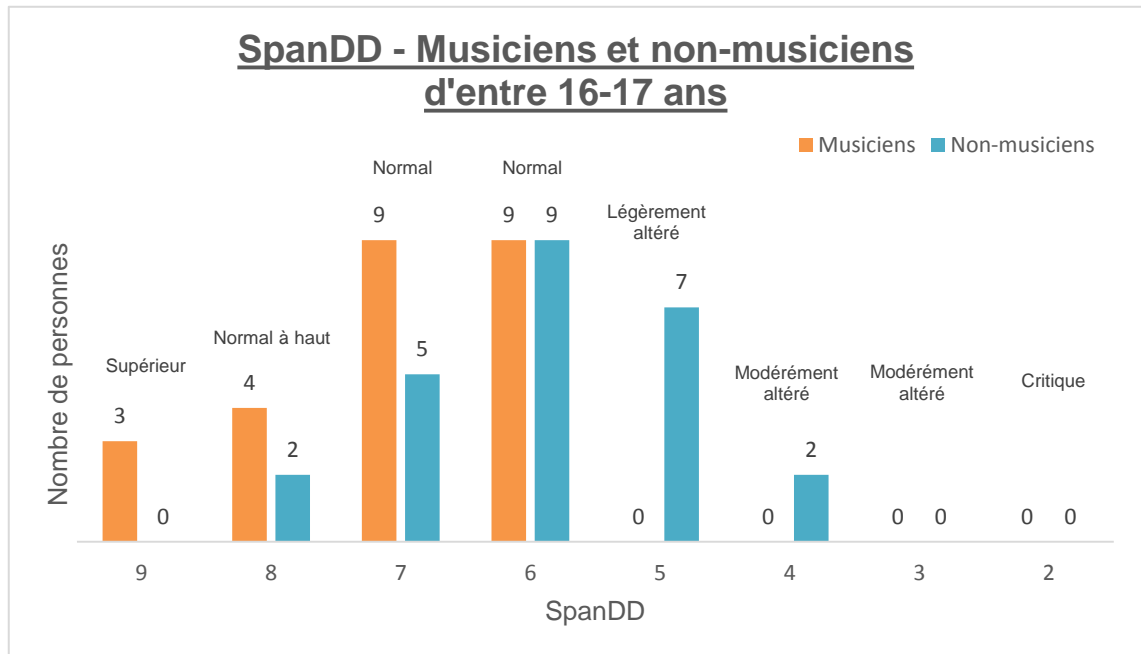
Tableau 6: Classification des ponctuations SpanDD

• Résultats

Le test d'attention est réalisé car habituellement ces épreuves ne se réalisent pas individuellement, mais avec un ensemble d'elles. Néanmoins, les résultats du test d'attention ne sont pas des données significatives pour la vérification de l'hypothèse, mais on peut considérer celui-ci un test qui peut aider tranquiliser le sujet pendant le test de mémoire de travail. Ainsi, les résultats obtenus sont les suivants :



Graphique 1 : Comparaison du SpanID entre sujets musiciens et non-musiciens



Graphique 2 : Comparaison du SpanDD entre sujets musiciens et non-musiciens

Les résultats peuvent être variés faute de la consommation de cannabis. Pour cela, avant la réalisation des tests le réalisateur a demandé au sujet s'il était consommateur de cannabis au moins une fois par semaine. Même si les effets peuvent varier selon la fréquence de la consommation, des informations concrètes sur la consommation de cannabis n'ont pas été demandées car l'objectif principale de ce travail n'était pas d'évaluer son effet. De plus, le nombre de personnes enquêtées qui étaient consommateurs n'était pas suffisamment grand pour extraire une conclusion complète. Cependant, il faut prendre en compte cette connotation.

	CONSUMATEURS	NON-CONSUMATEURS
<u>SUJETS MUSICIENS (25)</u>	2	23
<u>SUJETS NON-MUSICIENS (25)</u>	3	22

Tableau 7: Nombre de sujets consommateurs et non-consommateurs de cannabis

RÉSULTATS CONCRETS – CONSOMMATEURS DE CANNABIS

	Musiciens (2)	Non-musiciens (3)
SpanID	5 ; 6	5 ; 4 ; 2
SpanDD	9 ; 5	8 ; 5 ; 6

Tableau 8: Résultats concrets des sujets consommateurs de cannabis

CONCLUSIONS

Ayant réalisé la partie pratique et avec l'obtention des résultats, je peux corroborer que mon hypothèse est correcte : les étudiants de musique ont une meilleure mémoire de travail que ceux qui ne l'étudient pas. De plus, je peux constater que l'attention des étudiants de musique est aussi meilleure.

Trouver un neuropsychologue n'a pas été un procès facile. D'abord, j'avais l'intention de trouver un neurologue pour résoudre mes doutes, mais pendant la recherche de mon travail je me suis rendu compte que ce que je cherchais c'était une personne spécialisée d'une branche de la neurologie : la neuropsychologie. C'est alors que Mme. Saura, la neurologue avec qui j'avais pris contact m'a mis en rapport avec Mme. Bonet. Elle m'a proposé l'idée de réaliser le subtest de mémoire de travail du WAIS-IV, pour pouvoir comparer résultats entre les musiciens et les non-musiciens.

Concernant la partie pratique, j'aurais dû contrôler plus les variables comme le lieu de réalisation, la cadence numérique, parmi d'autres, afin d'obtenir des résultats plus précis. Je continuerais ce travail en faisant une comparaison plus exacte entre les étudiants de musique : je choisirais des sujets ayant étudié les mêmes années de musique et les mêmes heures par semaine. De plus, je réaliserais aussi ce test à des musiciens avec un âge plus avancé pour voir quel est l'effet à long terme.

Pendant tout ce travail, j'ai appris que le cerveau est un des organes les plus complexes à comprendre et pour lequel j'ai découvert une fascination. Il me semble extraordinaire comment le cerveau est capable de diriger et mobiliser toute l'information de laquelle on se sert. Plus on fait travailler le cerveau, plus de connexions neuronales se créent et donc, plus on peut l'utiliser. Je trouve incroyable l'effet que produit jouer d'un instrument pour le cerveau. L'augmentation de la matière grise est un effet si important que si on était capable de l'enregistrer sur notre ADN, l'humanité pourrait évoluer.

BIBLIOGRAPHIE

- A. R. Crossman, D. Neary, Elsevier Masson, *Neuroanatomía*, 2015.
- Baptiste Fauvel, Mathilde Groussard, Béatrice Desgranges Hervé Platel, *Pratique musicale et plasticité cérébrale : l'expertise musicale permet-elle de se préserver du vieillissement neurocognitif ?*, Rev. Neuropsychol., 2012.
- Blood, A. J.; Zatorre, R. J., *Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion*, proceedings of the National Academy of Sciences, 2001.
- Bolduc J., *Musique et habiletés cognitives au préscolaire*, Recherche en Education Musicale, 2009.
- Brattico E., Tervaniemi M., Naatanen R., Peretz I, *Musical scale properties are automatically processed in the human auditory cortex*, Brain Res., 2006.
- Charles J. Limb, Allen R. Braun, *Neural Substrates of Spontaneous Musical Performance: An fMRI Study of Jazz Improvisation*, 2008.
- Christian Gaser, Gottfried Schlaug, *Brain Structures Differ between Musicians and Non-Musicians*, Journal of Neuroscience, 2003.
- Conrad, R., *Acoustic confusions in immediate memory*, Brit J. Psychol., 1964.
- Croom, Adam M., *Music, Neuroscience, and the Psychology of Well-Being: A Précis*, Frontiers in Psychology, 2012.
- Estomih Mtui, Gregory Gruener, Peter Dockery, Elsevier Masson, *Fitzgerald. Neuroanatomía clínica y neurociencia*, 2017.
- Gottfried Schlaug, Lutz Jäncke, Yanxiong Huang, Jochen F. Staiger, Helmuth Steinmetz, *Increased corpus callosum size in musicians*, Department of Neurology, Heinrich-Heine University, 1994.

Groussard, M., La Joie, R., Rauchs, G., Landeau, B., Chételat, G., Viader, F., and others, *When music and long term memory interact: Effects of musical expertise on functional and structural plasticity in the hippocampus*, Plos One, 2012.

Huang Z, Zhang J, Yang Z and others, *Verbal memory retrieval engages visual cortex in musicians*, Neuroscience, 2010.

Krings, Timo; Töpper, Rudolf; Foltys, Henrik; Erberich, Stephan; Sparing, Roland; Willmes, Klaus; Thron, Armin, *Cortical activation patterns during complex motor tasks in piano players and control subjects. A functional magnetic resonance imaging study*, Neuroscience Letters. 2000.

Large, E. W.; Palmer, C., *Perceiving temporal regularity in music*, Cognitive Science, 2002.

Marin MM., *Effects of Early Musical Training on Musical and Linguistic Syntactic Abilities*, Ann New York Acad. Sci., 2009.

Mathilde Groussard, Renaud La Joie, Géraldine Rauchs, Brigitte Landeau, Gaël Chételat Fausto Viader, Béatrice Desgranges, Francis Eustache, and Hervé Platel, *When Music and Long-Term Memory Interact: Effects of Musical Expertise on Functional and Structural Plasticity in the Hippocampus*, publié en ligne en 2010.

Nadia Justel y Verónica Diaz Abraham, *Plasticidad cerebral: participación del entrenamiento musical*, Suma Psicológica, 2012.

Peter Schneider, Michael Scherg, H. Günter Dosch, Hans J. Specht, Alexander Gutschalk, André Rupp, *Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians*, Nature Neuroscience, 2002.

Pfordresher, P. Q.; Palmer, C, *Effects of hearing the past, present, or future during music performance*, Percept. Psychophys, 2006.

Repp, B. H, *Effects of auditory feedback deprivation on expressive piano performance*, Music Perception, 1999.

Rizzolatti, G.; Luppino, G.; Matelli, M., *The organization of the cortical motor system: new concepts*, Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol., 1998.

Schmidt, Louis A.; Trainor, Laurel J., *Frontal brain electrical activity (EEG) distinguishes valence and intensity of musical emotions*, Cognition & Emotion, 2001.

Schulze, K. & Koelsch, S., *Working memory for speech and music*, NY Acad. Sci., 2012

Schulze, K., and others, *Neuroarchitecture of verbal and tonal working memory in nonmusicians and musicians*, Human Brain Mapping, 2011.

Susan M. Courtney, Laurent Petit, James V. Haxby, Leslie G. Ungerleider, *The role of prefrontal cortex in working memory: examining the contents of consciousness*, Laboratoire du cerveau et cognition de l'Institute de santé mentale, 1998

Tramo, M. J., *Biology and music: Enhanced: Music of the Hemispheres*, Science, 2011.

Williamson, V.J., Baddeley, A.D. & Hitch, G.J., *Musicians' and nonmusicians' short-term memory for verbal and musical sequences: Comparing phonological similarity and pitch proximity*, Memory & Cognition, 2010.

WEBOGRAPHIE

Agnès Roux, Futura Santé, *Cellule de Schwann*, consulté le 9 septembre 2017, <http://www.futura-sciences.com/sante/definitions/biologie-cellule-schwann-14270/>

Caroline Wright, Memorising Music, *Music in working memory*, 24 février 2013, consulté le 1 décembre 2017, <https://memorisingmusic.com/2013/02/24/music-in-working-memory-literature-review/>

Cécile Thibert, Le figaro.fr, Que se passe-t-il dans le cerveau des musiciens quand ils improvisent ?, 13 janvier 2017, consulté le 15 novembre 2017, <http://sante.lefigaro.fr/actualite/2016/01/13/24487-que-se-passe-t-il-dans-cerveau-musiciens-quand-ils-improvisent>

Docteur Pierre-Yves Traynard, Docteurclic, *Hypothalamus*, 3 février 2010, consulté le 11 octobre 2017, <http://www.docteurclic.com/encyclopedie/hypothalamus.aspx>

Fédération pour la Recherche sur le Cerveau, *Anatomie du cerveau et du système nerveux*, consulté le 22 août, <http://www.frcneurodon.org/comprendre-le-cerveau/a-la-decouverte-du-cerveau/anatomie-du-cerveau-et-du-systeme-nerveux/>

Futura Santé, *Hypophyse*, consulté le 16 octobre 2017, <http://www.futura-sciences.com/sante/definitions/biologie-hypophyse-2720/>

Futura Santé, *Hypothalamus*, consulté le 11 octobre 2017, <http://www.futura-sciences.com/sante/definitions/biologie-hypothalamus-4133/>

Futura Santé, *Interneurone*, consulté le 25 septembre 2017, <http://www.futura-sciences.com/sante/definitions/biologie-interneurone-6252/>

Futura Santé, *Motoneurone*, consulté le 25 septembre 2017, <http://www.futura-sciences.com/sante/definitions/medecine-motoneurone-203/>

Futura santé, *Tronc cérébral*, consulté le 25 août 2017, <http://www.futura-sciences.com/sante/definitions/biologie-tronc-cerebral-13001/>

Jérôme Delécraz, Cognifit, *Cervelet : beaucoup plus que la coordination motrice*, 3 février 2007, consulté le 25 août, <https://blog.cognifit.com/fr/cervelet-beaucoup-plus/>

L'European Dana Alliance, Futura Santé, *La cellule nerveuse*, 26 octobre 2015, consulté le 25 septembre 2017, <http://www.futura-sciences.com/sante/dossiers/medecine-voyage-cerveau-525/page/3/>

Laurence O'Donnell, Brain & Mind, *Music and the Brain*, 1999, consulté le 2 novembre 2017, <http://www.cerebromente.org.br/n15/mente/musica.html>

Le cerveau à tous les niveaux, *La conduction nerveuse*, consulté le 27 octobre 2017, http://lecerveau.mcgill.ca/flash/a/a_01/a_01_m/a_01_m_fon/a_01_m_fon.html

Le cerveau et la musique, *Différences entre le cerveau du musicien et du non-musicien*, consulté le 11 novembre 2017, <http://cerveauetmusique.e-monsite.com/pages/partie-2/>

Manuel Lafarga y Penélope Sanz, GIPEM, *El papel de los hemisferios cerebrales en música*, 3 août 2009, consulté le 2 novembre 2017, <https://gipemblog.wordpress.com/2009/08/13/el-papel-de-los-hemisferios-cerebrales-en-musica/>

Marie-Céline Ray, Futura Santé, *Neurone sensitif*, <http://www.futura-sciences.com/sante/definitions/corps-humain-neurone-sensitif-16195/>

Neurobranchés, *Le neurone – Unité fonctionnelle du système nerveux*, visité le 19 septembre 2017, <http://neurobranches.chez-alice.fr/neurophy/leneurone.html>

Patrick Myers, www.medicine.unige.ch, *Le thalamus*, consulté le 5 octobre 2017, <http://www.medicine.unige.ch/enseignement/apprentissage/module3/pec/apprentissage/neuroana/1/1.4/14.htm>

Paul Sauleau, Sonia Dragomir, *Neurophysiologie*, Aphysionado, consulté le 1 septembre 2017, <https://sites.google.com/site/aphysionado/>

Quentin Nicard, passeportsanté.net, *Corps calleux*, juillet 2016, consulté le 1 octobre 2017, <http://www.passeportsante.net/fr/parties-corps/Fiche.aspx?doc=corps-calleux>

Santé médecine, *Cervelet-définition*, Mai 2017, consulté le 25 août 2017, <http://sante-medecine.journaldesfemmes.com/faq/8270-cervelet-definition>

Société canadienne du cancer, *L'encéphale et la moelle épinière*, consulté le 22 août, <http://www.cancer.ca/fr-ca/cancer-information/cancer-type/brain-spinal/brain-and-spinal-tumours/the-brain-and-spinal-cord/?region=on>

Sortie Robertson, News medical, *Que le Thalamus fait-il ?*, 21 juillet 2016, consulté le 5 octobre 2017, [https://www.news-medical.net/health/What-does-the-Thalamus-do-\(French\).aspx](https://www.news-medical.net/health/What-does-the-Thalamus-do-(French).aspx)

Vetopsy.fr, *Tronc cérébrale*, consulté le 25 août 2017, <http://www.vetopsy.fr/anatomie/systeme-nerveux/encephale/tronc-cerebral/tronc-cerebral.php>

Wikibooks, *Neurosciences/Les cellules du système nerveux*, consulté le 1 septembre, https://fr.wikibooks.org/wiki/Neurosciences/Les_cellules_du_syst%C3%A8me_nerveux#Les_cellules_gliales

Wikipédia, *Axone*, consulté le 12 septembre 2017, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Axone>

Wikipédia, *Cervelet*, consulté le 25 août 2017, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cervelet#Fonctions>

Wikipédia, *Corps calleux*, consulté le 1 octobre 2017, https://fr.wikipedia.org/wiki/Corps_calleux

Wikipédia, *Cortex auditif*, consulté le 15 novembre 2017, https://fr.wikipedia.org/wiki/Cortex_auditif

Wikipédia, *Dendrita*, consulté le 12 septembre 2017, <https://es.wikipedia.org/wiki/Dendrita>

Wikipédia, *Gyrus de Heschl*, consulté le 6 novembre 2017,
https://fr.wikipedia.org/wiki/Gyrus_de_Heschl

Wikipédia, *Hypophyse*, consulté le 16 octobre 2017,
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Hypophyse>

Wikipédia, *Moelle épinière*, consulté le 23 octobre 2017,
https://fr.wikipedia.org/wiki/Moelle_%C3%A9pini%C3%A8re

Wikipédia, *Neurone*, consulté le 12 septembre 2017,
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Neurone>

Wikipédia, *Neurosciences*, consulté le 1 novembre 2017,
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Hippocampe_\(cerveau\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Hippocampe_(cerveau))

Wikipédia, *Substance blanche*, 11 mai 2017, consulté le 22 août,
https://fr.wikipedia.org/wiki/Substance_blanche

Wikipédia, *Thalamus*, consulté le 5 octobre 2017,
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Thalamus>

