

Vers la compréhension des modifications physiologiques et neuro-anatomiques induites par la pratique musicale. Apport des études scientifiques.

Par Emmanuel **CULCASI**^{1,2}

Travail réalisé sous la direction scientifique du **Docteur Sophie THETIOT-LAURENT**³

Le contenu de la revue électronique relève de la législation française sur la propriété intellectuelle et est la propriété exclusive des auteurs des articles et du CNSMD de Lyon.

Les œuvres figurant sur ce site peuvent être consultées et reproduites sur un support papier ou numérique sous réserve qu'elles soient strictement réservées à un usage soit personnel, soit scientifique ou pédagogique excluant toute exploitation commerciale. La reproduction devra obligatoirement mentionner le nom de la revue, l'auteur, le CNSMD de Lyon et le titre complet de l'article.

Toute autre reproduction est interdite sauf accord préalable du CNSMD de Lyon, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France.

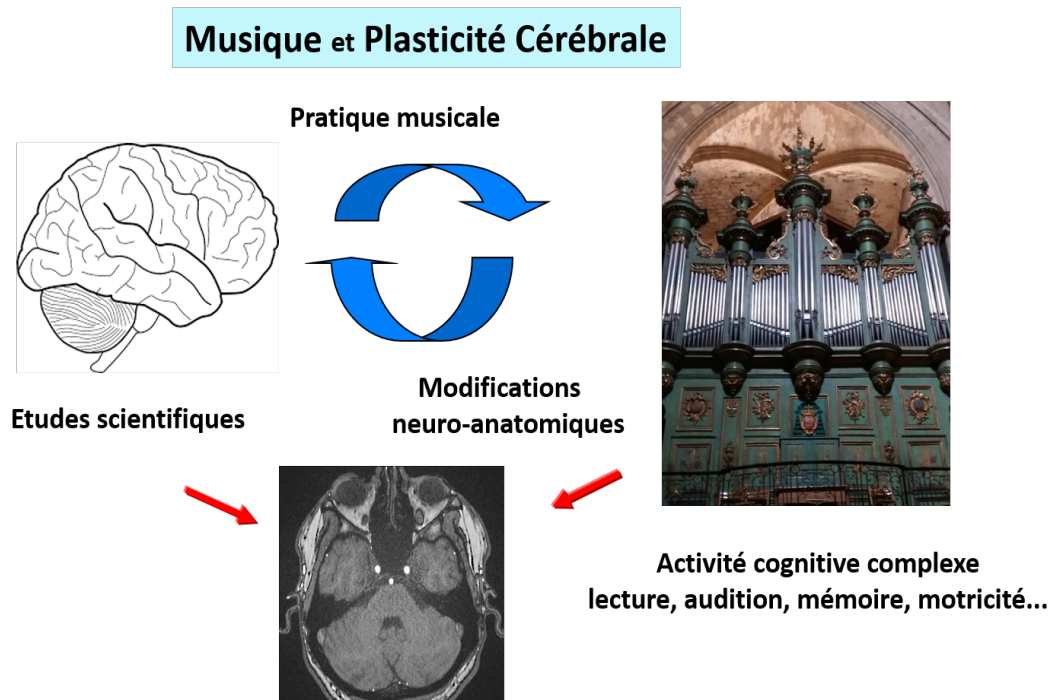
¹ Lauréat 2017 du CNSMD de Lyon (Master Orgue) et étudiant à l'Université d'Aix-Marseille (2015-2017; Stage de Master)

² L'auteur tient à adresser ses plus vifs remerciements aux personnalités scientifiques qui lui ont accordé un entretien, accepté d'exposer les grandes lignes de leurs travaux de recherche dans certains des domaines abordés dans ce manuscrit, ou indiqué des sources bibliographiques précieuses (Dr M. Besson; Dr M. Mékaouche, Prof. P. Roubertoux), ainsi que celles agissant en milieu associatif chez l'enfant sourd ou malentendant (*MESH*, Paris ; Mme M. Viallefond, Mr D. Chapy) ou en milieu hospitalier (*Musique et Santé*, Sanary ; Mr P. Bouteloup) et le Directeur de la Recherche au CNSMD de Lyon, Mr A. Poirier, pour sa relecture du manuscrit.

³ Maître de Conférence, Laboratoire ICR-UMR CNRS 7273, Université d'Aix-Marseille

Avant-Propos

Outre son enjeu artistique, le potentiel de la musique comme support d'activités cognitives, motrices ou de rééducation chez des personnes atteintes de divers troubles constitue un formidable enjeu pédagogique et thérapeutique. Cette contribution résulte de nombreuses discussions avec mes collègues musiciens professionnels, impliqués pour certains comme « sujets » dans des études scientifiques, ainsi que le corps professoral du CNSMD de Lyon, exprimant tout comme moi leur souhait de réunir des données synthétiques émanant de travaux scientifiques dont l'objectif est de bâtir une vision « rationnelle » des effets de la musique sur le cerveau.



Introduction

Depuis une trentaine d'années, de nombreux résultats scientifiques, convergent pour étayer l'hypothèse qu'il existe des liens étroits de cause à effet entre la pratique musicale, notamment la pratique quotidienne et intensive qui permet d'acquérir l'expertise musicale dans le cas des musiciens professionnels, et certaines modifications neuro-anatomiques. L'existence d'un tel impact de la musique sur la plasticité cérébrale est d'autant plus passionnante à explorer que la musique représente, d'une part, une aptitude mentale et motrice particulière rendue possible par la structure du cerveau humain et impliquant des aires spécifiques de cet organe, mais d'autre part, une activité qui conduit en retour à des modifications mesurables de la plasticité de ce même organe sous l'impact de l'exécution musicale.

Cet engouement pour l'exploration des localisations cérébrales qui seraient associées à l'aptitude musicale n'est certes pas nouveau ni contemporain. Si l'on examine l'historique des recherches dans ce domaine, dont les conclusions font maintenant parfois sourire, on découvre que dès la fin du XVIII^e siècle certains anatomistes se sont intéressés à la question, dont le très décrié Franz Joseph Gall pour son approche "phrénologique", qui a envisagé qu'une zone de « protubérance à chaque angle du front » soit impliquée dans l'expertise musicale (Lemarquis, 2009, p. 47). Quelques décennies plus tard, les travaux de l'anatomiste Léopold Auerbach, qui a réalisé l'examen post-mortem des cerveaux de musiciens célèbres et noté des particularités dans les zones temporales et pariétales, ont été diffusés, attestant de l'intérêt toujours vif pour ce débat (Hagner, 2008).

Grâce au développement récent des neurosciences, elles-mêmes s'appuyant sur des techniques modernes d'exploration *in vivo* indissociables du développement de puissants outils informatiques, on observe l'augmentation croissante d'études visant à déterminer les particularités morphologiques et physiologiques induites par la pratique musicale. Notons également que les études structurelles et fonctionnelles, notamment par imagerie cérébrale, s'appuient sur l'apport décisif des travaux d'histologistes et d'anatomistes de la fin du XIX^e siècle, 1) la découverte des neurones par Ramon Y Cajal (DeFelipe, 2002), 2) les avancées du développement de la cartographie cérébrale par des auteurs tels que Paul Broca, Karl Wernicke puis Korbinian Brodmann, bien que la subdivision de certaines aires subisse encore des ajustements (Houdé, Mazoyer & Tzourio-Mazoyer, 2002).

Dans ce contexte, l'objectif de cette contribution est double. Dans une première partie certaines études réalisées chez le sujet humain au cours des vingt dernières années seront détaillées. Ces recherches ont apporté des preuves tangibles que la pratique musicale, ou même l'audition régulière de musique, induisent le développement de particularités neuro-anatomiques, fonctionnelles et métaboliques.

2/

Les expérimentations menées chez l'animal seront également abordées, qui constituent le support de certaines connaissances biochimiques transposables à l'homme, ou qui sont par ailleurs réalisées pour accroître le bien-être animal dans des situations de stress ou de captivité. Une brève présentation des principes des techniques majeures d'exploration non invasives utilisées dans les études cliniques et expérimentales sera au préalable fournie.

Dans un second temps, des exemples d'applications de ces données scientifiques seront présentés, utilisés par leurs auteurs aussi bien dans une perspective pédagogique que « thérapeutique ». Par de multiples aspects, la musique pourrait exercer un impact en stimulant les zones neuronales en charge des émotions, entraînant des bénéfices visibles sur l'amélioration du lien social, la communication et le développement des capacités langagières dans diverses situations, dont les troubles envahissants du développement ou la dyslexie.



Figure 1 : La pratique musicale : une activité cognitive et motrice complexe et spécifique au type d'instrument utilisé (E.C. à l'orgue de la Cathédrale d'Annecy, 2017).

Globalement, il apparaît que la littérature scientifique, tout comme les ouvrages à destination du grand public, sont extrêmement abondants, montrant qu'il existe un intérêt soutenu et toujours en progression pour ce sujet à multiples facettes, traitant de l'effet de la musique sur la plasticité du cerveau de ceux qui la pratiquent, de quelque manière que ce soit. Les travaux de recherche proviennent de très nombreuses équipes, certaines en France (Schön, 2015 ; Chobert, Dittinger & Besson, 2014 ; Lechevalier, Platel & Eustache, 2010 ; AMARC⁴) et plus généralement en Europe (Vaucher, 2014 ; Stewart, 2008 ; Institute for Music in Human and Social Development⁵), aux USA⁶, au Canada, en Asie... montrant clairement que cette problématique présente un intérêt universel.

⁴ Association AMARC. <http://www.musicotherapie-amarc.org/>.

⁵ Institute for Music in Human and Social Development, Edinburgh, UK. <http://imhsd.eca.ed.ac.uk/>

⁶ Neuro Imaging Laboratory, Boston, MA, USA. <http://www.musicianbrain.com>

I. La musique : un puissant facteur de modulation de la plasticité cérébrale

A. Etudes chez les sujets musiciens par comparaison avec les non musiciens

En influençant les fonctions émotionnelles, physiologiques et motrices, la musique exerce de toute évidence des effets sur les capacités cognitives. Il apparaît maintenant indubitable pour les scientifiques que ces effets sur le cerveau se traduisent aussi par une forte influence sur la plasticité anatomique et fonctionnelle de cet organe, ceux-ci étant maintenant quantifiables par des techniques d'imagerie (Bermudez and Zatorre, 2005). Afin d'expliquer de telles observations, des mécanismes sont maintenant explorés au niveau cellulaire. Ainsi, il a été suggéré que la musique exerce un effet bénéfique en favorisant la régénération et la réparation des circuits neuronaux *via* la stimulation de la sécrétion de certaines hormones comme le cortisol, la testostérone et l'œstrogène, impliquées dans les processus de plasticité cérébrale, cognition et perception spatiale (Fukui, 2008). D'autres neuromédiateurs sont à l'étude (dopamine, sérotonine), montrant que l'aspect « neurochimique » de la musique (Chanda and Levitin, 2013), comme son effet potentiel sur l'expression génique et le transcriptome (Kanduri, 2015), constituent un nouvel aspect des futures recherches. Afin de relier certains de ces mécanismes observés au niveau cellulaire et les modifications anatomiques ou cognitives observables par des investigations cliniques, les musiciens sont très souvent au centre d'expériences visant à appréhender les phénomènes liés à l'expertise musicale (Kraus, 2010). Lors de l'exécution d'un morceau de musique, plusieurs tâches sont réalisées simultanément faisant de la pratique musicale une des activités parmi les plus complexes (Figure 1): la lecture de la partition, l'anticipation de l'activité motrice bi-manuelle, la précision gestuelle et métrique, des fonctions de mémorisation, d'improvisation, ainsi que l'audition de la musique ainsi produite, l'analyse de sa justesse ou des nuances souhaitées... De plus, comme nous le verrons au décours de ce manuscrit les modifications cérébrales observées sont aussi étroitement liées à l'instrument qui est pratiqué.

1. Généralités : quelques éléments de neuroanatomie

Selon de nombreux travaux qui seront décrits ci-après, l'organisation des différentes aires corticales relatives aux fonctions impliquées dans la pratique répétée de la musique apparaît modifiée de manière mesurable. L'effet de la musique, par son audition et sa pratique est susceptible d'agir sur le cerveau à trois niveaux: 1) l'augmentation du nombre de neurones impliqués, 2) l'amélioration de leur degré de synchronisation temporelle, et 3) l'augmentation du nombre et de la force des connexions synaptiques excitatrices et inhibitrices.

Pour mémoire, les cellules qui constituent le système nerveux humain (environ 300 milliards) sont classées en deux catégories, les neurones et les cellules gliales.⁷ Ces dernières (astrocytes, cellules microgliales, oligodendrocytes et épendymocytes) assurent le transport des ions avec les vaisseaux sanguins et la réparation des liaisons synaptiques, mais jouent aussi un rôle dans la rapidité des transmissions cérébrales et la plasticité (Han, 2013). Le neurone quant à lui est le principal élément de communication du système nerveux, qui transmet l'information à l'intérieur du cerveau et vers le système nerveux périphérique.

Les études menées sur le cerveau ont naturellement nécessité de parcelliser celui-ci en « aires cérébrales » afin d'en définir une topographie fonctionnelle et de s'accorder sur les localisations étudiées et impactées par un stimulus ou une pathologie (Houdé, 2002). Ainsi, est apparue une distinction entre la face corticale comprenant différents lobes externes (Figure 2) et une partie sous-corticale comprenant le lobe limbique et de multiples structures complexes, telles que le corps calleux. Le cerveau des mammifères est ainsi composé de deux hémisphères, comptant quatre lobes externes.

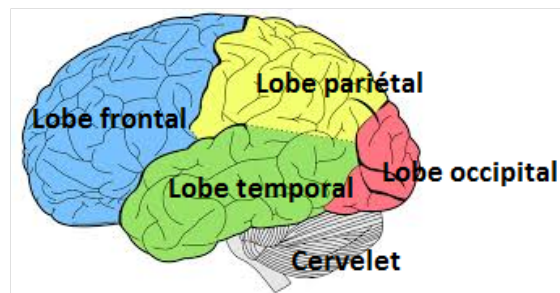


Figure 2 : Les différents lobes du cerveau situés sur la face corticale externe

D'après la vue latérale (Figure 2, Figure 3A), le lobe frontal est séparé postérieurement du lobe pariétal par le sillon central (scissure de Rolando). Le sillon latéral (scissure de Sylvius) forme la frontière entre les lobes frontal et temporal. Le lobe occipital est délimité par une ligne arbitraire tracée entre la fin du sillon pariéto-occipital et l'encoche pré-occipitale (Figure 3B). Le cortex insulaire est situé à l'intérieur du sillon latéral. Sur la coupe longitudinale (Figure 3B), le sillon cingulaire sépare les portions médianes des lobes frontal et pariétal du lobe limbique.

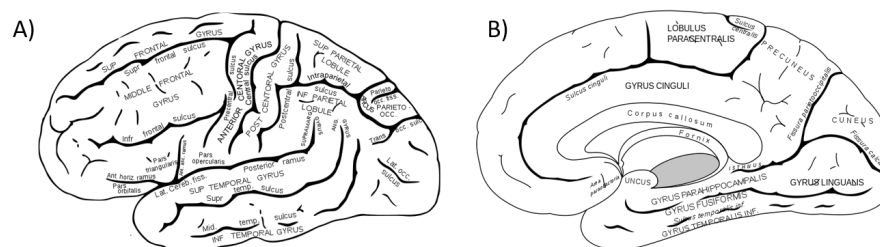


Figure 3 : Vues A) latérale et B) longitudinale d'un hémisphère.

Les rôles fonctionnels des différents lobes ont fait l'objet de définitions générales bien que tout ne soit pas complètement fixé ni figé (Houdé, 2002). Le lobe frontal est le lobe de l'action, de l'organisation des mouvements, des fonctions de planification, en bref, celui des actes volontaires et conscients. Il comprend des aires majeures comme celles de la motricité ou la zone de Broca impliquée dans le langage (Figure 4). Le lobe occipital comprend le cortex visuel, avec une partie postérieure dite « primaire », tandis que la partie antérieure traite les caractéristiques du stimulus

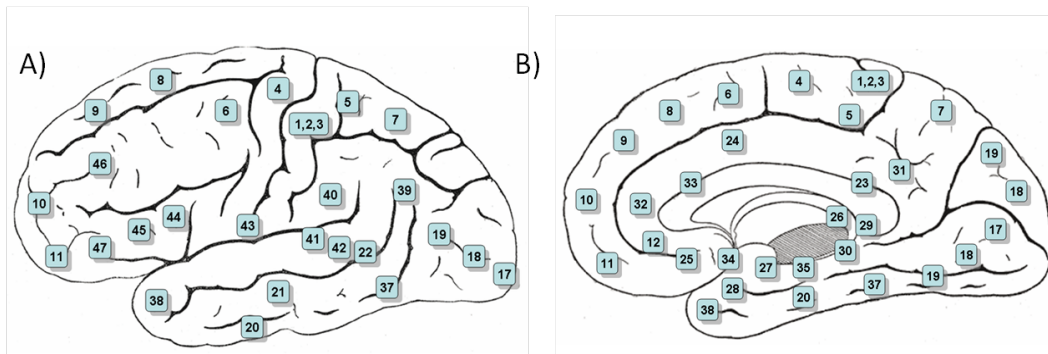


Figure 4 : Zones A) corticales et B) sous-corticales de Brodmann
 (<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/58/Gray727-Brodman.png>)

Le lobe pariétal contient des aires sensibles primaires ainsi que des zones permettant de relier des informations visuelles, tactiles olfactives et auditives. Il est impliqué dans le langage (écriture, parole), le calcul... Le lobe temporal est impliqué dans le langage (sens des mots) et la mémoire visuelle pour le lobe droit, la mémoire verbale pour le lobe gauche. Notons que la partie supérieure du lobe temporal, dédiée au traitement auditif, est composée d'une zone primaire appelée gyrus de Heschl et d'une zone secondaire qui traite le stimulus auditif.

Grâce à la combinaison d'expériences d'histologie, de techniques microscopiques et de coloration sur des cortex de cerveaux humains, une succession de travaux au XIX^e siècle ont permis de montrer que les différentes zones corticales du cerveau se différencient par des populations de cellules différentes. Les cellules de la même zone reçoivent les mêmes informations, sont connectées aux mêmes cibles et assurent une activité fonctionnelle semblable. En 1909, Brodmann a proposé une carte cyto-architectonique de 52 régions (régions corticales et sous-corticales). Certaines frontières ont été modifiées par les chercheurs pour donner la carte cartographie actuelle des aires de Brodmann présentée en Figure 4.

2. Principe des techniques d'exploration par imagerie in vivo

Dans ce paragraphe, seront brièvement décrites les techniques d'imagerie utilisées en milieu hospitalo-universitaire pour des études fonctionnelles, structurales ou métaboliques chez les patients souffrant de diverses pathologies ou troubles neurologiques. Ces techniques sont combinées par les cliniciens à des tests psychologiques ou cognitifs. Deux grandes catégories de techniques d'exploration par imagerie peuvent être distinguées. Tout d'abord celles basées sur la mesure des signaux électriques ou magnétiques issus du cerveau: l'électroencéphalographie (EEG) très utilisée en clinique et la magnéto-encéphalographie (MEG)⁸. Le point commun de ces méthodes est d'enregistrer les variations des courants électriques grâce à des électrodes dans différentes conditions de stimulation. Ces techniques ne donnent cependant pas d'indications sur le métabolisme et les mécanismes mis en jeu (enzymes, neuromédiateurs), ni sur la localisation précise de la source des signaux.

D'autres méthodes reposent sur l'utilisation d'un rayonnement électromagnétique et de puissants algorithmes mathématiques afin de réaliser des « coupes » de cerveau d'une grande finesse (quelques millimètres). Citons parmi ces méthodes, la tomographie par émission de positons (PET-scan ou TEP en anglais) et l'imagerie par Résonance Magnétique Nucléaire (IRM ou MRI en anglais)⁹. Globalement, ces deux méthodes donnent accès aux variations de flux sanguin, qui reflètent l'activité énergétique et le métabolisme des neurones. Toutefois, l'IRM ne donne pas accès à la résolution temporelle des fonctions cognitives, constituées d'évènements qui s'enchaînent à la vitesse de la milliseconde. Dans ce cas, la MEG est mieux indiquée car elle permet l'étude spatio-temporelle de l'activité cérébrale.

Notons que ces mêmes techniques sont utilisées dans les études de recherche qui nous intéressent dans ce mémoire, impliquant les volontaires musiciens et non-musiciens, et dont certains résultats notables seront présentés au § 1.3.

a) Electro-encéphalographie (EEG)

Le cerveau est le siège d'une activité spontanée biochimique et électrique, cette dernière montre des fluctuations sous l'effet d'un stimulus ou d'une pathologie. L'EEG et la MEG permettent de mesurer l'activité électrique des neurones. Alors que la MEG sera sensible aux sources situées sur les flancs des sillons corticaux, l'EEG permettra d'avoir accès à celles situées à la surface des sillons. Pour cela, des électrodes sont précisément placées sur le scalp d'un sujet (Figure 5A). L'activité électrique sous-jacente faisant suite à un stimulus est détectée, amplifiée et traduite informatiquement (Figure 5B).

71

⁸ CLES CEA 2007-2008, N°56 RMN, magnétisme et santé. Les Progrès de la magnétoencéphalographie. www.histrecmed.fr/images/MEG.pdf

⁹ Comprendre le cerveau par l'image. www.jeromepradolab.com/Media/p038_47_Lebihan.pdf

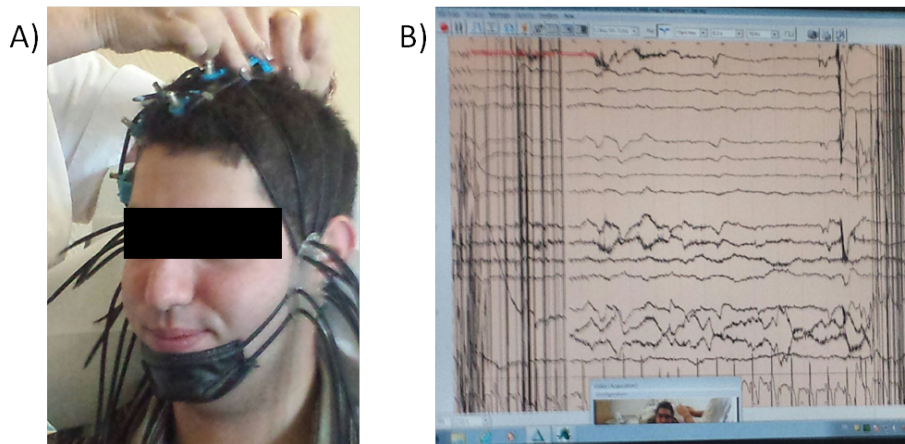


Figure 5 : A) Position de quelques électrodes en vue d'un EEG ; B) Exemple d'enregistrement de EEG.

b) Magnéto-encéphalographie (MEG)

À l'aide de capteurs positionnés à proximité de la tête, la MEG enregistre les très faibles champs magnétiques induits par les courants générés par les neurones. La MEG permet de déceler de très fines anomalies spatiales et temporelles, survenant par exemple dans le cas de la lecture de mots isolés chez l'enfant dyslexique; des anomalies peuvent être décelées dans la région occipito-temporale gauche impliquée dans la reconnaissance de la forme visuelle des mots (Habib et Besson, 2008).

c) Imagerie par résonance magnétique (IRM)

L'imagerie par résonance magnétique est basée sur le phénomène de résonance magnétique nucléaire (RMN) développé depuis une soixantaine d'années, utilisant majoritairement les propriétés des noyaux d'hydrogène et de phosphore. L'IRM est basée sur le principe que les protons (atome d'hydrogène) des tissus peuvent être assimilés à de petits éléments magnétiques (les spins). Suite à l'application extérieure d'un champ magnétique dans le scanner IRM, ces petits aimants interagissent avec le champ appliqué. Ainsi, de faibles changements détectables du signal magnétique se produisent et sont enregistrés. Les zones du cerveau qui présentent des concentrations différentes en protons et des environnements chimiques différents, verront des modifications de leurs propriétés magnétiques. Ainsi, différents tissus vont produire des signaux qui vont être analysés par le logiciel d'acquisition pour restituer des images montrant très clairement des différences de structure. La totalité du cerveau peut être présentée en coupes successives selon des plans axiaux, coronaux ou sagittaux.

Par rapport aux techniques de tomographie, les images issues d'IRM présentent une meilleure résolution et évitent l'exposition des sujets aux rayons X (Methods in Neuropsychology , 2007, pp 21-39).

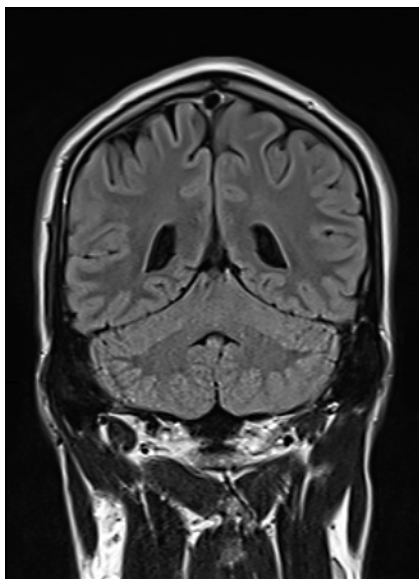


Figure 6 : Exemple d'un cliché obtenu par IRM. (EC)

En dehors de l'image morphologique avec sa sensibilité diagnostique démontrée, un prolongement de l'IRM est l'imagerie fonctionnelle (fIRM) qui utilise le même scanner qu'une IRM classique. Outre la structure du cerveau, cette technique permet aussi d'étudier l'activité de certaines zones au cours d'une même expérience. La technique de fIRM est basée sur l'analyse des changements subtils des taux sanguins d'hémoglobine (molécule responsable du transport de l'oxygène dans le sang) oxygénée et désoxygénée qui produisent une différence de signal magnétique. Ce contraste appelé BOLD (Blood Oxygenation Level Dependent) fournit une mesure

métabolique et hémodynamique indirecte de l'activité neuronale, qui est fortement consommatrice d'oxygène. Le contraste BOLD couvrant plusieurs secondes, la fIRM ne peut donc rivaliser avec la précision de l'ordre de la milliseconde de l'EEG. L'utilisation en parallèle de plusieurs techniques d'exploration sera donc indispensable.

1. Synthèse des principaux résultats décrits dans la littérature

Dans ce paragraphe, une synthèse des résultats les plus significatifs, au regard des modifications de la plasticité cérébrale observées chez les musiciens, sera présentée.

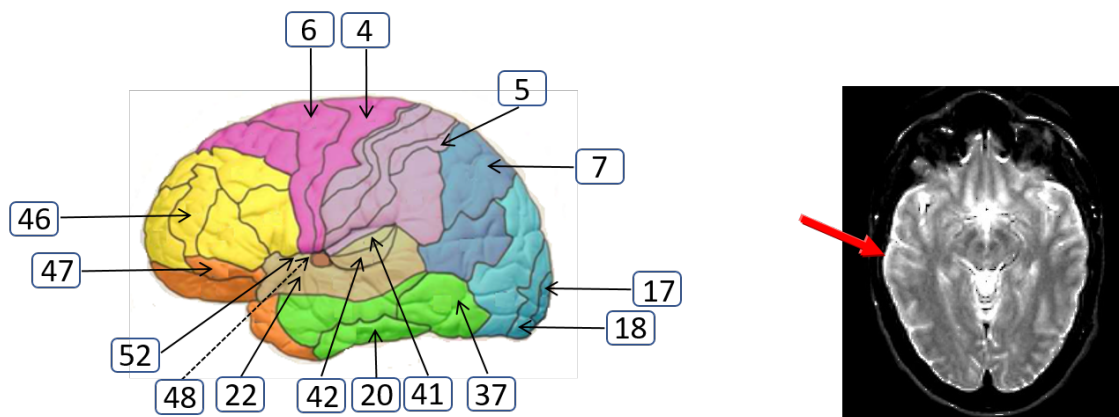


Figure 7 : Localisation des zones de volume plus important impliquées dans la pratique musicale, d'après Gaser (2003), Huang (2010), Schneider (2002). La zone 48, encore connue sous le nom d'hippocampe et décrite par Brodmann, ne figurait pas sur ses cartes du cortex humain.

9/

Tableau 1 : Description fonctionnelle des aires de Brodmann de volume plus important suite à la pratique musicale.

Zones	Description fonctionnelle de l'aire de Brodmann impliquée
4	Aire motrice primaire, appartenant au lobe frontal
5	Aire sensorielle associative appartenant au lobe pariétal. Zone du traitement des informations somato-sensorielles, reconnaissance au toucher d'objets familiers, cortex d'association.
6	Cortex prémoteur, appartenant au lobe frontal. Zone de la planification de tâches complexes, de mouvements coordonnés et volontaires.
7	Cortex pariétal supérieur, appartenant au lobe pariétal. Zone de la localisation dans l'espace et de la coordination visuo-perceptive.
17	Aire visuelle primaire, appartenant au lobe occipital. Zone du traitement visuel des informations statiques et mobiles.
18	Cortex visuel associatif, zone dite secondaire, appartenant au lobe occipital. Zone du traitement de l'information visuelle en profondeur.
20	Aire temporale associative, appartenant au lobe temporal. Zone impliquée dans la reconnaissance visuelle et la mémoire.
22	Aire temporale associative, appartenant au lobe temporal. Impliquée dans la compréhension du langage et le traitement auditif
37	Gyrus fusiforme, appartenant au lobe temporal. Zone impliquée dans les processus mnésiques.
41 - 42	Cortex auditif primaire formant le gyrus de Heschl et associatif. Zone impliquée dans le traitement et la discrimination des sons
46	Région du cortex frontal impliquée dans la mémoire spatiale et de la planification.
48	Portion du cortex parahippocampique
52	Insula (cortex insulaire)

Un schéma synthétique de ces résultats est présenté en fig. 7 qui est associée au Tableau 1 pour le détail des aires cérébrales impliquées.

a) Modification des structures cérébrales auditives et visuelles

Les différences entre les musiciens et non-musiciens portent logiquement en priorité sur les zones du cerveau activées lors de la pratique musicale (Wan, 2010). Les musiciens réalisent de manière répétée des exercices quotidiens, qui associent des actions motrices complexes à l'exécution de sons qui doivent être parfaitement discriminés en temps réel, tout en lisant des notes en continu. Cette pratique exerce un effet multi sensoriel permanent sur l'individu ce qui renforce les connections entre les zones auditives et motrices, particulièrement au niveau du faisceau arqué qui relie l'aire de Broca (Zones 44 et 45) à celle de Wernicke (Zone 22), toutes deux impliquées dans le langage. De telles modifications entraînent une amélioration des capacités cognitives et motrices (Wan, 2010; Pantev and Herholz, 2011). Bien que l'on en sache encore assez peu sur la manière dont le cerveau analyse les sons complexes, des résultats récents suggèrent certaines catégorisations dans les zones cérébrales temporales, incluant le cortex auditif, selon qu'il s'agisse de la reconnaissance de la voix humaine, de la musique (Leaver and Rauschecker, 2010).

À titre d'exemple, en utilisant la technique de MEG des chercheurs ont montré que la morphologie du gyrus de Heschl (Zones 41 et 42) est modifiée de manière bilatérale, ce qui représente un volume de 130 % supérieur au cours de l'activation du cortex auditif chez les musiciens (Schneider, 2002). De plus, on observe chez les musiciens un *planum temporal* gauche plus développé (Zones 22 et 37), un effet d'asymétrie tout particulièrement observé chez ceux qui ont l'oreille absolue (Schlaug, 1995a). Cette caractéristique rend par ailleurs les sujets plus sensibles à la structure des sons et à la discrimination des notes, résultats montrés par la mesure de l'activité cérébrale électrique lors de tests mettant en œuvre l'écoute de sons ou de mots incongrus (Besson, 2007). Des résultats convergents montrent que les musiciens produisent des réponses plus efficaces et plus rapides (discrimination et mémorisation des sons) à des stimuli auditifs mais également audiovisuels suggérant que la pratique musicale entraîne une forte différence de plasticité de plusieurs zones sous-corticales (Musacchia, 2007).

De manière intéressante, une étude récente sur 20 sujets, a établi que chez les musiciens, la restitution de mots mémorisés lors de tâches uniquement auditives, implique néanmoins conjointement une activation très importante et inattendue du cortex visuel (Huang, 2010). Ce phénomène n'est pas observé chez les non musiciens. Ces auteurs ont aussi montré l'activation d'autres zones cérébrales avec des différences notables de volume entre musiciens et non-musiciens lors des tâches suivantes :

1) mémorisation du maximum de mots dissyllabiques parmi 20 mots proposés séparés d'une seconde,

2) restitution mentale du maximum de mots en appuyant sur un bouton à chaque mot. Ces différences touchent essentiellement des zones dédiées aux activités motrices, à la mémoire (Zone 46), à l'apprentissage et au stockage de l'information sur le long terme (Zone 48) et à la vision (Zones 17 et 18). L'activation du cortex visuel chez les musiciens pourrait indiquer que la réorganisation cérébrale aiderait les neurones de différentes zones à coopérer sur une tâche donnée.

Tableau 2 : sélection de zones montrant une plus forte activation lors des tâches de mémorisation et de restitution chez les musiciens (Huang, 2010)

Structures anatomiques	% d'augmentation	Volume (mL)	
		Musiciens	Non-musiciens
Tâche de mémorisation			
Hippocampe gauche	140	2916	1215
Gyrus frontal moyen gauche	28	7452	5832
Cortex insulaire droit	16	2673	2295
Tâche de restitution			
Cortex insulaire gauche	5	3024	2889
Hippocampe droit	25	3861	3078

Ainsi, il a été montré qu'en plus de développer des compétences spécifiquement liées à cette pratique, l'activité musicale peut stimuler d'autres compétences par effet de transfert, ce qui est essentiel pour une utilisation potentielle de la musique à des fins thérapeutiques (Patel, 2010). Ainsi, plus les enfants ont pratiqué la musique, plus le procédé de traitement de la parole s'avère robuste (Strait, 2012). Pour expliquer cela, les travaux d'une équipe américaine se sont focalisés sur le fait que jouer de la musique modifie les mécanismes d'encodage au niveau cortical (Musacchia, 2007). Les chercheurs ont montré que les réponses du tronc cérébral sont plus robustes chez les musiciens. L'activité neuronale intervient précocement dans la réponse, bien avant l'activation du cortex primaire auditif. Les musiciens auraient ainsi appris à faire plus attention aux détails des stimuli acoustiques en développant en parallèle des zones aptes à coopérer.

b) Réorganisation et modification de la plasticité cérébrale

La comparaison directe entre les sujets musiciens et non-musiciens montre un volume de matière grise plus important dans certaines régions du cerveau (Bermudez and Zatorre, 2005). Il a aussi été montré que des zones corticales sont diversement modifiées selon l'instrument pratiqué. Par exemple, les zones correspondant aux deux derniers doigts de la main gauche chez les violonistes ou celles des lèvres des trompettistes ont une surface corticale plus importante chez les musiciens (Elbert, 1995; Pantev, 2003).

Le gyrus précentral dans le cortex moteur des non-musiciens droitiers montre généralement par IRM une asymétrie en faveur de l'hémisphère gauche; cette asymétrie est réduite chez les musiciens droitiers, tout particulièrement les claviéristes et les cordes. Cette réduction est probablement liée à un accroissement du nombre de synapses par neurones dans le cortex moteur gauche, lié aux performances de la main droite dominante, mais aussi du développement de l'habileté de la main non dominante qui impacte des zones voisines (Amunts, 1997). Une autre équipe a montré une modification de la densité de la matière grise dans l'hippocampe (Aire 48), zone impliquée dans la mémoire à long terme déclarative (Groussard, 2010). Le réseau neuronal recruté serait plus étendu chez les musiciens que les non-musiciens lors d'un épisode de reconnaissance de mélodies familières.

Des différences entre musiciens et non-musiciens se voient également au niveau du corps calleux, une zone située sous les aires 23 et 33 (Figure 4). Afin d'apprécier l'importance de telles modifications, il faut garder en mémoire les fonctions différentes et complémentaires des deux hémisphères cérébraux (Habib, 2009). Le corps calleux est situé entre ces deux hémisphères et sert à accroître l'interaction entre ces derniers. Il permet de faire le lien entre le réel et l'imaginaire, l'objectif et le subjectif. On imagine aisément que les musiciens sollicitent en continu les deux hémisphères lors de l'interprétation d'œuvres musicales, ce qui explique sans doute pourquoi le corps calleux se développe très rapidement. À titre d'exemple, plusieurs équipes ont démontré par IRM que la communication entre les deux hémisphères serait favorisée chez les musiciens par des corps calleux de taille supérieure (Schaug, 1995b; Gaser, 2003 ; Lee, 2003). Le volume total de ce dernier est de 665 ± 91 mm² et 619 ± 70 mm² chez les musiciens (hommes) et non-musiciens respectivement (Lee, 2003). Les résultats montrent des différences très significatives lorsque les résultats sont obtenus au niveau de la zone antérieure du corps calleux. De manière inattendue, ces auteurs mettent en évidence un effet genre, puisque cette augmentation n'est pas observée chez les femmes musiciennes, suggérant que cela pourrait être lié à une organisation cérébrale initialement plus symétrique chez les femmes.

L'entraînement musical améliore aussi la motricité en général et pas seulement les mouvements en lien avec la musique. Par exemple, les musiciens imitent des séquences de gestes données avec plus d'exactitude que des non-musiciens (Spilka, 2010). De nombreux travaux ont mis en évidence l'impact de la musique à la fois sur les aires cérébrales relatives à la motricité et à l'audition (Chen, 2006).

Ces travaux ont été confirmés par Brown (2007) et par Zatorre (2007) qui ont montré que l'écoute de morceaux musicaux active des régions cérébrales motrices mais que c'est bien la pratique qui les modifie (Huang, 2010; Pantev, 2011). Les auteurs montrent aussi que les pianistes ont de meilleurs résultats que les musiciens d'instruments à corde dans les exercices de reproduction de rythmes. Là encore, l'entraînement spécifique des pianistes est mis en avant pour son impact sur la plasticité cérébrale. Une asymétrie bi-manuelle a été mise en évidence chez des pianistes droitiers moins développée que les droitiers non-musiciens. Une équipe allemande a montré que l'entraînement de la main gauche dans leur pratique musicale expliquerait cette différence notable (Jäncke, 1997).

De manière intéressante, des effets de la musique sur la plasticité peuvent également être observés à moyen et court terme, chez l'enfant comme chez l'adulte. Ainsi, des modifications anatomiques dans les aires auditives et motrices ont été mises en évidence par IRM après 30 min de piano par semaine, pendant 15 mois, chez des enfants de 6 ans, initialement non-musiciens au démarrage de l'étude (Hyde, 2009).

Par des enregistrements d'EEG, d'autres travaux montrent que les effets de la musique sont mesurables encore plus rapidement. Cinq sessions hebdomadaires de 20 minutes de piano commencent en effet à induire des réponses électriques significativement différentes dans les zones antérieures audio-motrices de l'hémisphère droit, impliquées dans la représentation mentale du clavier (Bangert, 2003). Enfin, d'autres scientifiques ont montré une augmentation de l'activité neuronale dans l'hippocampe antérieur gauche suite à une incongruité de la régularité rythmique après deux semestres d'entraînement musical chez l'adulte (Herdener, 2010). Cette même région montrerait des différences fonctionnelles entre musiciens professionnels et non-musiciens soumis au même exercice.

Des auteurs ont montré que la plasticité à court terme du cortex auditif existe toujours chez des personnes adultes (Pantev, 1999; Wan, 2010). De tels effets ont été montrés chez des adultes écoutant un morceau musical 3 h/jour pendant 3 jours. En supprimant une fréquence donnée (1 kHz), la réponse neuronale à cette fréquence est abaissée (Pantev, 1999). D'autres travaux utilisant la fIRM ont montré que l'écoute de sons plaisants et déplaisants (dissonants) suscite des émotions dont l'effet est directement corrélable à une activation élevée de l'hippocampe, du cortex inférieur frontal latéral et de la partie antérieure du gyrus temporal supérieur (Koelsh, 2006).

En résumé, un nombre très conséquent d'études scientifiques internationales ont successivement montré au cours des vingt dernières années des différences notables spécifiquement liées à la pratique musicale, avec des différences marquées selon l'instrument utilisé. Quelques-uns des résultats les plus parlants obtenus sur un large panel de zones cérébrales sur lesquelles l'effet de la musique a été mesuré, mettant en œuvre les diverses techniques électrophysiologiques ou de neuroimagerie, sont consignés dans le Tableau 3 ci-après.

2. Conclusions

Certaines des conclusions les plus marquantes issues des résultats scientifiques analysés peuvent être synthétisées ainsi :

- a) la pratique de la musique induit un grand nombre de modifications anatomiques et fonctionnelles en impliquant les aires auditives, somato-sensorielles, motrices, visuelles mais aussi des zones cérébrales voisines qui ne sont pas spécifiques de la musique,
- b) un entraînement à moyen terme pourrait induire des changements morphologiques identiques (dans certaines zones) à ceux observés chez les musiciens qui possèdent une longue pratique (sans apporter pour autant une expertise musicale de même niveau),
- c) la possibilité d'intervenir efficacement au niveau de la plasticité cérébrale par des moyens relativement simples basés sur des stimulations ou une pratique à court ou moyen terme chez l'adulte ou l'enfant permet d'envisager des voies thérapeutiques ou pédagogiques ou de « remédiation »

Tableau 3 : aires du cerveau impliquées dans la pratique musicale en fonction de l'instrument

Sujets, Instruments et Techniques	Zones du cerveau concernées et effets majeurs observés au cours des expériences	Références
9 MP, cordes + 6 NM MEG et IRM	Mise en évidence d'une asymétrie chez les musiciens. Surface du cortex cérébral droit plus vaste correspondant à une représentation plus importante des doigts de la main gauche. Corrélation avec les années de pratique	Elbert, 1995
60 sujets (M et NM). IRM	Augmentation de la taille d'une région du cortex temporal (planum temporale) chez les musiciens	Schlaug, 1995a
51 sujets (21M et 30 NM)	Diminution de l'asymétrie du cortex moteur correspondant à la main dominante chez les musiciens	Amunts, 1997
30M et 30 NM. Clavier + cordes. Morphométrie IRM 56M (28H, 28F) et 56NM	Augmentation de 12% du corps calleux chez les musiciens qui ont commencé avant 7 ans Cet effet est moins marqué pour un démarrage plus tardif de la musique En 2003, la même équipe montre que cet effet n'est pas significatif chez les musiciennes	Schlaug, 1995b Lee, 2003
37 sujets tous instruments (NM, MA et MP). MEG et IRM (volumétrie)	Augmentation du volume de substance grise dans le cortex auditif (gyrus de Heschl, GH) chez les MP (+130%) mais aussi les MA (+60%) selon la localisation dans le GH. Corrélation avec l'aptitude musicale (score AMMA, sous l'effet de stimuli sonores:100-5600Hz).	Schneider, 2002
26MP Clavier + cordes et 26 NM. Technique VBM	Augmentation de la densité de matière grise dans l' Aire de Broca (gyrus frontal inférieur gauche). Meilleurs résultats aux tests d'analyse visio-spatiale. Corrélation avec les années de pratique	Sluming, 2002
60 sujets MP (30 H et 30 F, claviers) et 60 sujets NM. Technique IRM	Augmentation du volume du cervelet chez les sujets (H seulement) MP par rapport aux NM, et ce, proportionnellement à la durée et à l'intensité de la pratique musicale (nombre d'années de pratique et d'heures/jours)	Hutchinson, 2003
17NM Piano (20 min) + 9 MP (piano). EEG	La pratique musicale à court terme intensive modifie très rapidement le cortex moteur. La région droite antérieure est plus rapidement activée en raison de la représentation mentale qui est faite du clavier	Bangert, 2003
20 MP Piano, 20 MA et 40 NM VBM	Plus de matière grise dans cervelet gauche , les régions sensori-motrices et certaines zones du lobe antérieur préfrontal gauche. Longueur du gyrus précentral (marqueur de la zone motrice corticale de la main) plus importante. Corrélations avec les années de pratique (MP, ~39 ans ; MA, ~18 ans)	Gaser, 2003
64sujets: 16 MP Piano, 16MP violon et 32 NM.	Signe de l'Ω (un peu asymétrique sur l'hémisphère gauche) chez les pianistes, sur l'hémisphère droit seulement (violon), montrant le plus fort développement de la région motrice de la main gauche pour les cordes	Bangert, 2006
Sujets M et NM. Techniques IRMf et VBM	Plus forte activation (IRMf) de l' hippocampe gauche (+ zones temporales et gyrus de Heschl) chez les M vs NM au cours d'une tâche impliquant la mémorisation musicale à long terme. Modifications structurelles (VBM) de l'hippocampe (mémorisation), augmentation de matière grise.	Groussard, 2010

MP, musiciens professionnels; NM, non musiciens ; MA, musiciens amateurs ; H, hommes ; F, femmes ; MEG magnétoencéphalographie; IRM Imagerie par Résonance Magnétique ; IRMf Imagerie fonctionnelle ; VBM, morphométrie cérébrale; GH, Gyrus de Heschl; AMMA test, Advanced Measures of Music Audiation ;

B. Apport de l'expérimentation animale à la compréhension des mécanismes cellulaires et physiologiques de la musique sur le cerveau

3. Quels modèles animaux pour quelles expériences ?

De nombreuses études s'intéressent aux sons émis par les animaux c'est à dire le chant, les vocalisations et autres sons ou cris, vecteurs de communication sociale. Cet aspect social et cognitif des vocalisations et de l'apprentissage du chant chez les jeunes oiseaux ou autres espèces animales, est étudié par les scientifiques car le tempo, la spécificité des sons et le rythme peuvent aussi renseigner par analogie sur certains aspects de la communication chez l'humain.

Un autre versant des études chez les animaux, qui est celui qui nous intéresse, vise à étudier ainsi l'impact physiologique, émotionnel, voire morphométrique de la musique « humaine » chez certaines espèces animales qui s'y prêtent, et ce, avec au moins deux objectifs :

- Tout d'abord, comme dans le cas des humains, de nombreuses études s'attachent à évaluer l'apport bénéfique qui pourrait résulter de l'audition de la musique principalement chez les animaux en captivité ou les animaux de laboratoire (Alworth and Buerkle, 2013). Ces études sont assez récentes, car elles correspondent à une prise de conscience de la nécessité de limiter le stress, l'ennui et la souffrance animale et d'apporter un enrichissement à leur espace de vie. Des Directives Européennes¹⁰ et internationales ont été publiées à ce sujet dans le cadre des projets de recherche, mais aussi pour la protection des animaux domestiques et l'élevage.
- En second lieu, et c'est cela qui sera plus particulièrement développé dans cet article, des essais sur l'animal peuvent être réalisés en appui des recherches menées chez l'homme, à des fins de compréhension de l'impact émotionnel ou biologique de la musique sur le cerveau.

¹⁰ <http://www.recherche-animale.org> (dernière consultation le 12/10/2017).

Un nombre encore limité d'études chez l'humain propose actuellement des hypothèses quant aux mécanismes cellulaires neurobiologiques, physiologiques ou métaboliques (Fukui, 2008; Chanda and Levitin, 2013), émotionnels, et même géniques (Kanduri, 2015) qui sous-tendent les modifications visibles de la plasticité cérébrale sous l'impact de la pratique ou de l'audition musicale. Ceci pourrait être lié au nombre d'études relativement faible chez l'animal bien que ce nouvel axe ait récemment pris son essor (Alworth and Buerkle, 2013; Bryant, 2013). En utilisant des modèles animaux appropriés (Rickard, 2005) de telles données peuvent être plus rapidement obtenues que chez l'humain pour les raisons suivantes :

- un grand nombre d'animaux semblables (âge, taille, conditions d'élevage, nourriture, environnement) peuvent être inclus dans les études, permettant d'obtenir des résultats plus homogènes,
- des analyses sur de plus grandes populations, des dosages biologiques ou des mesures électro-physiologiques peuvent être réalisés,
- les animaux peuvent être isolés de la musique, y compris pendant la phase de gestation prénatale, constituant ainsi que des groupes d'individus « vrais » contrôles de ceux exposés à la musique,
- les variations à l'intérieur d'un groupe expérimental peuvent être considérablement réduites par rapport aux sujets humains, telles que les préférences individuelles, la culture...

Il faut toutefois souligner que si certaines espèces non humaines peuvent percevoir la musique de manière semblable à l'humain, pour d'autres, les sons ne sont pas perçus de la même manière, que ce soit en termes de fréquence, d'intensité et de durée. Les humains sont capables d'entendre des sons sur une plage de fréquence allant de 20Hz à 20kHz environ, bien que la meilleure sensibilité soit en réalité mesurée pour la plage allant de 200 Hz à 8 kHz, la fréquence de 4 kHz correspondant à la dernière octave d'un clavier de piano (Rickard, 2013). Le singe Rhésus possède une plage proche de celle de l'homme ce qui a motivé des études visant à analyser la stimulation neuronale par des sons dans le cortex auditif (Tsunada, 2011). Cette plage de sensibilité est aussi partagée avec de très nombreuses espèces d'oiseaux (Doupe and Kuhl, 1999).

Chez les rongeurs on constate, d'après les audiogrammes chez le rat, une très grande sensibilité sur une plage allant de 8 à 32 kHz (Heffner, 2001), ce qui explique que les études soient pour la plupart faites chez le rat, ou la souris. Néanmoins, la communication sociale du rat se fait dans la zone des ultrasons.

Pour ce qui est de la réponse « affective » de l'animal vis-à-vis de la musique, de nombreuses études ont observé le comportement social des animaux (comportement agressif, attraction vis-à-vis des congénères...) en fonction du type de musique (classique, ethnique, country, contemporain...). Des expériences se sont multipliées (Rickard, 2005), au cours desquelles des oiseaux ou des rats avaient la possibilité de changer de perchoir ou de cage en fonction de la musique diffusée, le choix se portant invariablement sur Bach ou Vivaldi et non pas sur de la musique atonale ou dont les stimuli sont probablement ressentis comme trop stressants (musiques contemporaine ou techno).

L'approche sur les animaux peut sembler réductionniste au regard de ce que la musique représente sur le plan artistique et émotionnel. Ces recherches ont cependant déjà apporté des éléments tangibles montrant que certaines voies physiologiques et métaboliques sont activées consécutivement à l'écoute passive de la musique chez des animaux, ce qui n'est pas le cas de contrôles entendant uniquement des bruits non musicaux. Un autre avantage de ces études est de s'affranchir du facteur humain, culture, goûts personnels, âge, environnement (Rickard, 2005).

4. Exemples de résultats biologiques obtenus et perspectives d'applications chez l'homme

Pour illustrer ce chapitre, trois études chez l'animal ont été sélectionnées car elles ont permis d'obtenir des données mesurables (biochimiques et physiologiques) directement vérifiables en parallèle chez l'homme, et dont les conclusions ont depuis lors été transposées en milieu hospitalier. L'objectif de ces essais est de rationaliser l'utilisation de la musique afin de diminuer l'angoisse et le stress chez les sujets avant ou après les gestes opératoires et les anesthésies (gestion du stress et de la douleur), et de réduire les doses de médicaments anxiolytiques ou antalgiques à effets secondaires indésirables.

La première étude concerne un essai incluant plusieurs groupes de rats, réalisé au cours d'une anesthésie de 60 minutes chez ces animaux, en présence soit de bruits ou d'une succession de pièces de musique classique (Schumann et Chopin), l'un ou l'autre protocole étant maintenu à un niveau sonore de 50dB (Nakamura, 2007). Les conclusions de cette étude ont montré sans équivoque une action régulatrice de la musique (et non pas des bruits non musicaux) sur la pression sanguine et l'activité sympathique rénale, action bénéfique qui disparaît en cas de lésions du cortex auditif ou de la cochlée (entraînant une surdité) chez les rats de groupes supplémentaires. Cette étude fait suite à un premier travail montrant que la musique de Mozart (Sonate K205) a un effet régulateur de la pression sanguine et du taux de dopamine dans le tissu cérébral chez le rat spontanément hypertendu (Sutoo and Akiyama, 2004).

Une autre étude destinée à promouvoir et à optimiser l'utilisation de la musique en milieu hospitalier, a consisté à ajouter un protocole musical (100-16000 Hz, Sonate pour piano de Mozart KV361, Largo 8'35", répétitions successives pendant 24h) à un traitement par la simvastatine (1 ou 10 mg/kg/jour) chez le rat, un médicament donné pour réduire, entre autres, le risque d'infarctus du myocarde, le taux de cholestérol, l'anxiété et les lésions traumatiques cérébrales (Niehues da Cruz, 2011). L'action conjuguée de la simvastatine et de la musique a permis d'accroître l'effet anxiolytique du médicament à la plus faible dose, effet mis en évidence par des mesures comportementales et de taux sériques de neurotransmetteurs (dopamine..)

Le troisième essai a été réalisé chez des souris exposées pendant 21 jours à 6h d'écoute de musique « New Age », étant placées à un mètre de la source musicale (50-60 dB). Après anesthésie et sacrifice au 22^{ième} jour, les chercheurs ont montré des modifications notables des neurotransmetteurs sécrétés au niveau tissulaire dans l'hypothalamus, le taux de facteur neurotrophique étant doublé et celui de croissance des nerfs (impliqué dans l'inflammation et le stress) étant diminué de 2 fois. Ces résultats mettent en évidence sans équivoque l'effet modulateur de la musique sur les voies physiologiques liées au stress (Angelucci, 2007).

II. Transfert des connaissances à des fins pédagogiques ou « thérapeutiques »

Plusieurs éléments caractérisent la musique: la hauteur fréquentielle, le rythme, la syntaxe... chacun étant relié à une ou plusieurs aptitudes mentales, souvent non spécifiques de la musique (Huang, 2010). Ainsi, le rythme est lié aux compétences motrices alors que la syntaxe d'un morceau de musique se rapproche du traitement du langage. Différentes formes de mémoire interviennent, que la musique soit écoutée, chantée ou pratiquée instrumentalement. S'ajoute à cela une part émotionnelle qui stimule d'autres aires du cerveau. On comprend aisément pourquoi l'activité musicale est de nature à favoriser chacune de ces compétences mais aussi leur coordination (Gaser, 2003; Zatorre, 2007; Hannon, 2007; Huang, 2010; Besson, 2011).

1. Troubles de l'apprentissage du langage et dyslexie

Le langage et la musique partagent certaines caractéristiques neuro-anatomiques et possèdent des composantes acoustiques et temporelles proches. Ces ressources communes seraient à l'origine des effets de transfert observés lors de l'amélioration du langage suite à un entraînement musical (Habib *et al.*, 2008 et 2009; Cason, 2015). En effet, il existe une corrélation entre l'expertise musicale et la perception de la prosodie du langage. Certains neuroscientifiques ont montré que les musiciens détectent mieux les incongruités dans une langue étrangère que les non-musiciens (Marques, 2007). D'une manière similaire, la comparaison de la prosodie de phrases à des mélodies donne de meilleurs résultats chez les musiciens, et ce, que ce soit dans leur langue maternelle ou non (Thompson, 2003). Enfin, d'autres auteurs ont observé une amélioration de la lecture de mots complexes chez des enfants non-musiciens de 8 ans ayant reçu un entraînement musical (Moreno, 2009).

Ces observations sont régulièrement mises à profit pour remédier aux troubles du langage, que leur origine soit acquise ou développementale. Ainsi, des exercices musicaux pratiqués pendant 15 semaines par des enfants dyslexiques induisent une amélioration de la reproduction de structures rythmiques, du traitement auditif et de la conscience phonologique (Overy, 2003). Le traitement de la musique et du langage s'effectue dans les mêmes zones du cerveau (les aires temporelles et l'aire de Broca).

Les musiciens professionnels ont des capacités de langage exacerbées et discriminent mieux les sons. Ils ont l'habitude de lire des partitions, qui se lisent autant de gauche à droite (comme en français) que de bas en haut, pour distinguer la hauteur des sons (Musacchia, 2007; Patel, 2010).

Contrairement aux enfants musiciens, les enfants dyslexiques présentent un déficit du traitement de la durée des syllabes et du Voice Onset Time (VOT). Six mois d'apprentissage musical permettent d'améliorer le traitement pré-attentif du VOT chez les enfants dyslexiques (Chobert, 2014). Dans une étude menée sur des enfants dyslexiques de 8 à 11 ans, d'autres auteurs ont montré que 60 % de ceux ayant suivi une activité musicale (instruments à percussion, jeux de rythme avec les syllabes, jeux de synchronisation) à raison de 2 séances par semaine pendant 6 mois, avaient amélioré leur capacité de lecture au point de sortir des critères diagnostiques de dyslexie contre 28 % pour les enfants ayant pratiqué la peinture (Flaugnacco, 2015). Cette étude a également montré que 75 % des enfants ayant pratiqué l'activité musicale avaient amélioré leur capacité de déchiffrage (contre 36 % pour les enfants ayant pratiqué la peinture).

2. Réhabilitation par la musique chez les victimes d'accident vasculaire cérébral (AVC)

Plusieurs études basées sur des groupes de sujets victimes de troubles sensori-moteurs suite à un accident vasculaire cérébral, ont montré que les patients qui ont suivi des entraînements musicaux (par exemple 5 séances de 30 minutes par semaine, pendant 3 semaines) ont appris à jouer des gammes et des mélodies simples sur un piano ou sur une batterie électronique (Schneider, 2007; Altenmüller, 2009). Trois semaines après le début de l'entraînement, ces sujets montrent des gestes plus rapides, précis et continus que ceux qui ont suivi une thérapie traditionnelle sans apport de la musique. De plus, les sujets ayant suivi la thérapie musicale ont moins de problèmes moteurs dans les activités de la vie quotidienne. Selon Altenmüller *et al.* 2009, cette amélioration des performances correspondrait à des modifications des EEG dans le cortex moteur. Cependant, il est difficile de conclure que les effets observés chez ces patients sont directement liés à la pratique de la musique plutôt qu'à l'exercice d'une activité bi-manuelle qui s'oppose à la thérapie traditionnelle d'immobilisation du membre valide. D'autres études ont basé leur thérapie sur une écoute de musique quotidienne durant 6 mois montrant des progrès de ces patients dans la récupération de la mémoire des mots, de l'attention et du langage, ainsi que la récupération d'une densité de matière grise supérieure (IRM et VBM) à celle des patients sans écoute musicale (Särkämö, 2014).

3. Cas de la Meta-analyse sur les lésions cérébrales acquises

La lésion cérébrale acquise (trauma, dommages post-opérationnels, blessure) provoque souvent des handicaps à long terme (en 2003, 135.000 personnes (UK) ont été dénombrées vivant avec des problèmes consécutifs à des blessures à la tête). Une méta-analyse consiste à faire le bilan des diverses études réalisées et publiées dans la presse scientifique à comité de relecture sur une période prédéfinie. L'analyse de la Cochrane Library (Magee, 2017) montre qu'une stimulation auditive rythmique améliore la rapidité, la cadence, la longueur et la symétrie de la foulée chez les patients victimes d'AVC. Les interventions musicales montrent une amélioration de la communication en général, même si l'étude ne permet pas de tirer les conclusions sur la méthode la plus bénéfique (active ou réceptive). Les méthodes actives impliquant le chant peuvent être bénéfiques pour adresser des difficultés sur la nomination et la répétition.

4. Maladies neuro-dégénératives de Parkinson et d'Alzheimer

La musique a montré des effets positifs chez des patients atteints de la maladie de Parkinson au niveau de la vitesse, de la cadence de la démarche, de la longueur des pas effectués grâce à un entraînement auditif régulier lors de la marche (Thaut, 1996; Lim, 2005). D'autres auteurs ont montré que la marche de sujets parkinsoniens est améliorée lorsque ces sujets sont entraînés à chanter mentalement en se déplaçant (Satoh, 2008). De plus, la musique améliorerait les mouvements bucco-faciaux impliqués dans la parole (Thaut, 2001).

Les bénéfices de la musique ont aussi été mis en évidence dans la maladie d'Alzheimer, pour laquelle la mémoire à court terme fait défaut. Des ateliers d'apprentissage de chants nouveaux par répétition au cours de séance hebdomadaires d'1h30, à des sujets atteints de formes sévères de la maladie ont montré qu'au bout de huit semaines, la mélodie devenait familière. Ces sujets se sont montrés capables d'apprendre une nouvelle mélodie mais certains d'entre eux ont également réussi à les reproduire hors contexte d'apprentissage (Platel and Groussard, 2010). Ce sentiment de familiarité a également été montré suite à l'exposition passive et répétée à des musiques, poèmes ou tableaux inconnus. Ces approches suggèrent que la plasticité cérébrale peut perdurer tout au long de la vie (Greenwood, 2007).

Plusieurs études ont aussi montré que la musique pouvait aider les sujets atteints de la maladie d'Alzheimer tant sur l'activité physiologique que sur leur état psychologique. Une étude portant sur 20 patients atteints de cette pathologie et participant à 18 sessions (3 par semaine) de 30 minutes de musicothérapie (chant, utilisation d'instruments, danse) a montré une diminution des symptômes d'agitation, d'agressivité et d'anxiété (Svansdottir and Snaedal, 2006). Les effets d'écoute musicale hebdomadaire sur l'anxiété et la dépression de patients au stade léger de la maladie d'Alzheimer ont également été montrés (Guétin, 2009).

La musique a également permis de stimuler la motricité de patients et de maintenir ou rétablir la communication. Les auteurs ont montré que la musique jouée directement devant les patients induisait des bienfaits plus significatifs que l'écoute de musique enregistrée (Götell, 2003; Holmes, 2006)

Enfin, de manière intéressante, dans une étude portant sur 23 musiciens âgés (77 ± 7 ans) d'un même orchestre, les auteurs ont observé qu'aucun de ces sujets ne présentaient de déclin cognitif, ce qui s'écarte de la prévalence estimée dans la population (Grant and Brody, 2004).

5. Gestion du stress et de la douleur

Il a été montré que la musique peut diminuer l'anxiété préopératoire chez des enfants atteints de cancer (Good, 2001; Wang, 2014). Ainsi, les musicothérapeutes accompagnent les enfants avec des stratégies de relaxation qui les aident à lutter contre le stress et la douleur. Les effets de la musique ont également été appréciés dans les salles de réveil post-anesthésie. Par ailleurs, de nombreux thérapeutes ont montré que la musique pouvait distraire les patients en soin dans les services des grands brûlés.

6. Cas particulier de l'enfant sourd ou malentendant

Un projet d'enseignement de la musique destiné aux enfants sourds pourrait paraître paradoxal, mais en réalité la musique peut constituer un vecteur émotionnel et de communication non plus sonore mais tactile et visuel¹¹.

24/

¹¹ In « *Scolariser les Elèves Sourds ou Malentendants* » (2009), CNDP, Collection Repères Handicap. Ministère de l'Education Nationale. Direction générale de l'Enseignement scolaire.

Certaines parties de ce qui la compose, du moins les rythmes, les intensités et les vibrations, peuvent être transmises en empruntant des voies auxquelles le cerveau va s'adapter, et qui permettront la représentation d'un univers sonore et musical en stimulant des zones inattendues. L'enseignement de la musique se fera en développant des techniques qui substituent le son par le toucher, la vibration et le visuel telles que des plateaux vibrants associés à la projection « d'images sonores » montrant les fréquences jouées et ressenties grâce au plateau. La notion de plasticité cérébrale prend ici une fois encore tout son sens, jouant sur la capacité unique du cerveau à développer plusieurs autres sens à la place d'un seul, pour « percevoir la musique plutôt qu'entendre », la jouer et la partager.

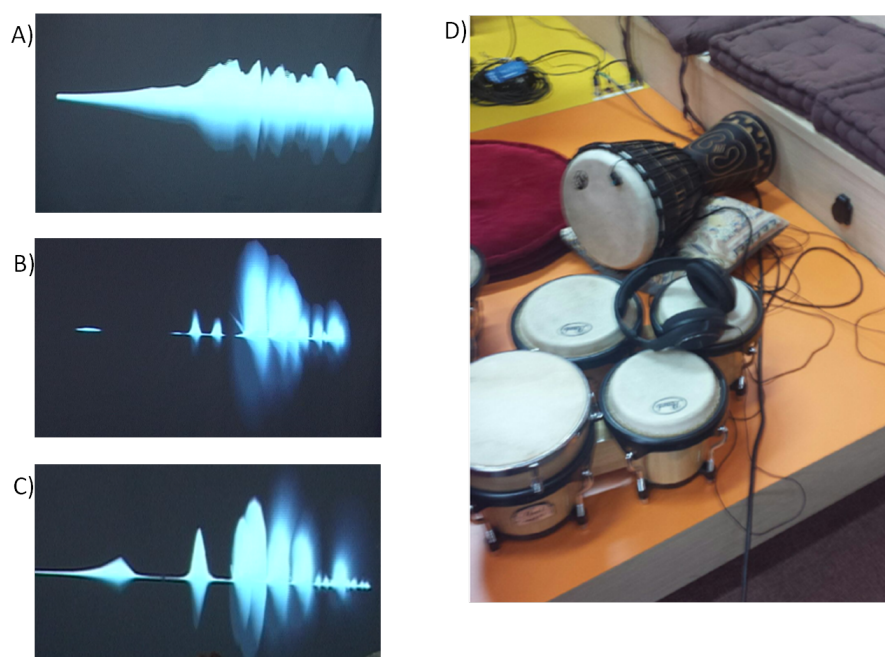


Figure 8. Diffusion « d'images sonores » issues A) d'un tambourin contenant des billes, B) d'un triangle et C) d'une cloche. Les sons musicaux sont des « sons complexes », mélanges de sons graves et aigus. Le son musical est la superposition d'un son fondamental et d'harmoniques. D) Instruments reliés aux plateaux vibrants utilisés lors des exercices

L'adaptation L'adaptation des zones cérébrales stimulées (cortex visuel, zones motrices, tactiles et de mémorisation) peut se faire de façon très rapide et aux dépens du cortex auditif très peu développé chez l'enfant sourd, consécutivement aux stimulations sensorielles par le toucher et la vibration (Figure 8D). La lecture de la musique par le biais de l'interprétation des fréquences (son aigus et graves, amplitudes faibles ou fortes) représentées sur les images sonores (Figure 8 A,B,C) qui défilent à l'écran.

7. Cas particulier de l'autisme

a) Avant-Propos

Plus de soixante ans après la première description de l'autisme (Leo Kanner, Hans Asperger), l'utilisation des termes « troubles du spectre autistique » (TSA) ou « syndromes autistiques » ou « troubles envahissants du développement » pour définir l'autisme, est acceptée par l'ensemble des professionnels, de la neurobiologie à la psychiatrie, comme définissant un ensemble de troubles neurologiques empêchant globalement l'enfant autiste de s'ouvrir à l'autre. L'autisme est actuellement exploré par de multiples voies. Le développement de la neuro-imagerie a permis de mettre en évidence la localisation de certaines zones de dysfonctionnement cérébral; de même, la génétique prend une place croissante dans le débat. Il apparaît clairement que les causes de cette pathologie sont multiples, et que les techniques de pointe précédemment évoquées, bien qu'indubitablement indispensables pour disposer de connaissances de plus en plus fines, sont encore loin de porter leurs fruits sur le plan curatif. Cependant, à la lumière de ce faisceau de connaissances récentes et en constante progression, de nouvelles orientations peuvent être proposées pour une prise en charge plus adaptée qui se doit d'être multidimensionnelle. Parallèlement à la scolarisation de l'enfant, lorsque cela est possible, on assiste par conséquent à un intérêt grandissant pour développer des conditions adaptées (milieu associatif, milieu hospitalier...) permettant d'intervenir sur les plans éducatif, rééducatif et psychothérapeutique en incluant de nouvelles idées provenant de ces données. La communication par la musique et par le sport prennent une place grandissante dans ces interventions.

c) Les troubles neurologiques chez l'enfant autiste : apports potentiels de la génétique

L'autisme est un trouble sévère du développement de l'enfant qui apparaît en général avant l'âge de trois ans, et se caractérise par un déficit des capacités de communication verbale et non verbale, des centres d'intérêt restreints ou stéréotypés, des interactions sociales restreintes, des troubles du langage, ainsi qu'une peur à l'égard de l'imprévu et de l'inconnu.

L'autisme touche 4 fois plus fréquemment les garçons que les filles, s'associe à un retard mental dans environ 75 % des cas. La moitié des sujets ne développent pas un langage verbal.

Les mécanismes qui sous-tendent ces troubles, qu'ils soient cérébraux, génétiques, métaboliques et cognitifs, font actuellement l'objet de recherches intensives¹². Bien que dans la majorité des cas, l'étiologie de la pathologie reste inconnue, il est important de signaler que dans 30 % des cas, une cause génétique a été formellement identifiée (par exemple les gènes SHANK2, SHANK3, DLGAP2, PTCHD1... codant pour des protéines responsables de l'établissement de points de contact entre les neurones ou impliquées dans la transmission de signaux intracellulaires...). Un consensus émerge peu à peu, selon lequel l'autisme serait fréquemment associé à des perturbations génétiques comme le syndrome de l'X fragile (délétions sur le chromosome X) ou à des anomalies chromosomiques, les gènes impliqués étant différents selon la gravité du handicap. Des expériences récentes ont pu être menées sur des souris, suite à l'identification du gène murin Nlgn4, et ont montré, chez la souris invalidée pour ce gène, la présence de troubles des interactions sociales et du comportement, ainsi que d'une baisse de vocalisation (Chaste, 2012).

d) Utilisation de l'imagerie par résonance magnétique pour le bilan clinique de l'autisme

L'application des techniques récentes de neuro-imagerie par IRM à un large nombre d'enfants atteints de troubles autistiques, a permis d'établir l'existence d'anomalies anatomiques et fonctionnelles dans certaines régions du cerveau impliquées dans la perception et la cognition sociale: le cortex orbito-frontal, le sillon temporal supérieur et le gyrus fusiforme, entre autres (Chen, 2011 ; Dichter, 2012; Zilbovicius, 2013). À titre d'exemple, des chercheurs ont montré, en réalisant des analyses statistiques des images obtenues, une diminution de la substance grise au niveau de la région temporale supérieure chez les enfants autistes comparés à un groupe témoin (Figure 9).

¹² <http://www.inserm.fr/actualites/rubriques/actualites-recherche/l-autisme-grande-cause-nationale-2012> (dernière consultation le 03/03/17).

En outre, des expériences d'IRM fonctionnelle, qui permet de mesurer le débit sanguin de régions cérébrales soit au repos soit pendant la réalisation de tâches (écoute de sons par exemple), ont montré une diminution du débit sanguin cérébral au repos dans la région temporale supérieure chez les enfants autistes. Plus le débit sanguin au repos est faible, plus l'autisme est sévère (Boddaert, 2009).

Enfin, des anomalies ont également été montrées dans la substance blanche, qui est composée de fibres qui assurent la liaison entre les différentes régions cérébrales. Normalement, la substance blanche est organisée en faisceaux qui relient les différentes aires du cerveau. Les images obtenues montrent que les faisceaux de substance blanche ne sont pas connectés dans une même direction au niveau du lobe temporal des patients autistes. Globalement, les résultats de l'étude de Boddaert *et al*, 2009 ont montré que plus de 40 % des enfants autistes présentent des anomalies cérébrales, un résultat obtenu par l'analyse systématique des images de 77 enfants âgés de 2 à 16 ans atteints d'autisme, sans cause identifiée. Les données obtenues par IRM et fIRM pourraient donc constituer une nouvelle piste de recherche à approfondir pour étudier les bases neurologiques de l'autisme.

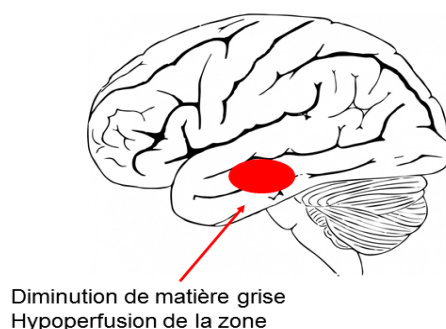


Figure 9 : Localisation des anomalies anatomiques et fonctionnelles chez des enfants autistes. Des anomalies anatomiques (diminution de la substance grise) et fonctionnelles (diminution du débit sanguin cérébral au repos) ont été mises en évidence par imagerie par la technique d'IRM au niveau des deux lobes temporaux supérieurs. D'après les travaux de Boddaert *et al*, 2009. (doi:10.1371/journal.pone.0004415.g003).

Dans la perspective d'explorer si, outre des différences dans la structure et le fonctionnement de certaines zones cérébrales, l'autisme pouvait également s'accompagner de différences quantitatives en neuromédiateurs ou certains composés cellulaires impliqués dans le métabolisme énergétique, les techniques de spectroscopie et d'IRM ont récemment permis de détecter une carence de créatine chez les patients autistes, une molécule majeure dans le stockage d'énergie, notamment des cellules nerveuses.

Aujourd'hui, il est possible de faire bénéficier ces patients d'un traitement en créatine, qui entraîne, en partie, une régression des symptômes. Seul l'examen de spectroscopie permet de faire un tel diagnostic (Clark, 2015).

L'aire spécialisée dans la perception de la voix humaine est localisée dans le sillon temporal supérieur et représente une zone clef pour la communication car elle contribue à l'identification de l'identité et de l'état émotionnel de celui qui nous parle. Une faible activation de cette zone a été observée chez certains autistes lorsqu'ils écoutent la voix humaine. Le dysfonctionnement de ce système chez l'autiste donne un début d'explication quant aux difficultés à isoler la voix humaine du monde sonore et à l'identifier.

Par ailleurs, plusieurs études ont montré des anomalies dans les processus cérébraux impliqués dans le traitement des visages, provenant d'une faible activation d'une région du cortex spécialisée dans leur reconnaissance et localisée au niveau du gyrus fusiforme dans le lobe temporal. Cependant, ce phénomène pourrait aussi être lié à la façon dont les sujets, avec troubles du spectre, voient les visages à cause d'une diminution de la fixation du visage par hyperréactivité émotionnelle ou un défaut d'attention. Ces résultats pourraient être mis en lien avec les difficultés sociales et de communication et le caractère inhabituel et paradoxal de la réaction aux sons observée dans les TSA. Elle peut ainsi permettre de réfléchir sur des stratégies thérapeutiques plus adéquates, et de travailler sur une rééducation plus adaptée, comme apprendre à regarder l'autre. Les chercheurs utilisent de plus en plus la technique du suivi du regard ou eye-tracking, afin d'évaluer les différences entre ce que regardent les autistes et ce que regardent les autres (Saitovich, 2012), l'attention des autistes étant plutôt attirée par des objets, des lettres ou des chiffres, plutôt que les personnages, expliquant leurs difficultés de compréhension des actions ou situations. De plus, il a été constaté que l'autiste ne regarde jamais ou rarement les yeux de l'autre.

L'ensemble de ces résultats issus des neurosciences semblent indiquer l'existence de problèmes dans le développement neurobiologique chez les enfants atteints de syndromes autistiques. Il est important de garder toutefois à l'esprit que les auteurs de ces travaux sont conscients qu'il est prématuré de prétendre discriminer si les anomalies observées font partie des causes du handicap ou en sont des conséquences, suite au déficit de stimulation de ces zones cérébrales, lié aux problèmes d'interactions sociales et de communication.

De ce fait, l'origine biologique de ces anomalies au cours du développement du cerveau, serait plus précoce et de nature encore inconnue (Tordjman, 2005).

e) Méthodes utilisées en pédagogie musicale: communiquer par l'imitation

La mise en œuvre de pratiques musicales avec des enfants atteints d'autisme et l'utilisation de la musique comme un vecteur de communication est un enjeu majeur des professionnels des milieux hospitaliers et associatifs. En effet, comme l'ont confirmé les résultats issus des neurosciences en identifiant les zones cérébrales impliquées dans cette déficience, mettant des images d'IRM sur ce qui était déjà largement compris et ressenti auparavant, la musique représente une compétence cognitive qui peut être partagée, créant des effets émotionnels, un lien social sans jamais n'avoir de signification comparable au langage parlé. Un premier constat est l'attrait puissant que la musique exerce sur les enfants autistes, qui se saisissent pour la plupart de cette discipline artistique, quel que soit leur niveau intellectuel. Dans certains cas, l'oreille absolue et de très grandes capacités de mémorisation sont observées et associées à une très grande intelligence et dextérité instrumentale.

L'imitation à proprement parler joue un rôle essentiel pour l'apprentissage de la musique chez l'enfant autiste, étant donné les troubles avérés de la communication qui caractérisent ce handicap. Il existe par ailleurs deux versants de l'imitation qu'il convient d'exploiter :

- L'imitation sert à l'apprentissage : il faut montrer de la nouveauté aux enfants, les intéresser et susciter l'envie de reproduire les gestes et les sons spontanément. Les musiques du monde sont particulièrement attractives¹³.
- Etre imité correspond à l'autre versant de cette communication par la musique qui doit être suscitée, afin de révéler à l'enfant autiste que son action peut être à l'origine de celle d'autrui et peut aussi être simultanée, dans la perspective d'un essai de musique « ensemble ». Cette expérience représente un pas de plus vers un des fondements de la reconnaissance de soi.

L'ensemble des éléments primordiaux qui sous-tendent l'emploi de l'imitation spontanée chez l'enfant autiste est très bien décrit (Nadel, 2005).

¹³ www.musique-sante.org (dernière consultation le 03/03/2017).

f) Apport de la musique

De nombreuses études ont été menées, permettant de mieux comprendre les particularités sensorielles chez les autistes, notamment au niveau auditif ainsi que le potentiel de la musique comme thérapie (Trevorthen, 2005; Geretsegger, 2014). Il est couramment observé que les autistes montrent à la fois des réactions d'évitement face à certains sons non musicaux, émis par exemple par des appareils de la vie quotidienne, ainsi qu'une hypersensibilité auditive (hyperacousie). En revanche, les enfants autistes développent pour la plupart une très forte attirance pour des stimuli auditifs quand ils sont musicaux et certains développent même des compétences exceptionnelles (Heaton, 2003), alors même qu'ils ont par ailleurs des difficultés à utiliser le langage oral. Cette apparente contradiction s'explique maintenant par les progrès de la neuroscience, montrant que les zones impliquées et/ou stimulées sont différentes. Tout particulièrement, l'oreille absolue est retrouvée environ 400 fois plus fréquemment chez les autistes (Heaton, 2003). L'aptitude de discrimination (les sons sont augmentés de 1, 2 ou 3% par rapport à la fréquence de départ, les sujets classent les sons en pareils / différents) et de catégorisation (les sujets classent les sons en grave / aigu par rapport à un son pur d'une fréquence de 1000 Hz) des fréquences a été testée chez 12 jeunes adultes autistes et 12 sujets contrôles (O'Riordan, 2006). Les auteurs montrent que les sujets autistes discriminent mieux les sons (pour 2 et 3% d'augmentation des fréquences) et catégorisent mieux que les contrôles. L'observation très courante de ces comportements atypiques motive donc pleinement l'utilisation de la musique qui semble, donc, tout à fait judicieuse pour aider à l'apprentissage des sujets autistes.

En résumé, l'apprentissage de la musique et/ou la musicothérapie auprès des enfants autistes est un formidable outil pour : 1) améliorer les comportements sociaux (créer des interactions, aider à communiquer, focaliser l'attention, etc.), 2) diminuer les comportements de stress ou d'agressivité, 3) favoriser l'expression des sentiments, iv) faire découvrir son corps et l'espace environnant à l'enfant autiste. Chanter peut représenter un moyen de susciter l'acquisition de l'expression verbale et d'apporter une compensation au déficit de communication.

Conclusions

Il apparaît à la lecture de la littérature, dont une sélection seulement a été présentée dans ce manuscrit, que l'apport des neurosciences et des techniques modernes d'exploration a une importance majeure pour étudier l'interaction de la musique avec les différents domaines de la cognition et de la santé. On retrouve la musique dans toutes les civilisations humaines, mais ce n'est que depuis une vingtaine d'années que des études, notamment sous l'influence de plusieurs équipes françaises (CNRS, Universités d'Aix Marseille, Caen, Montpellier, Paris Descartes..), tendent à montrer que la musique exerce non seulement des effets du point de vue cognitif de nature à modifier très rapidement la plasticité cérébrale, mais rationalisent également peu à peu l'utilisation qui peut en être faite dans une perspective thérapeutique. Malgré les controverses que soulèvent certaines interprétations des résultats obtenus en neuro-imagerie (Tordjman, 2005), examens qui sont souvent pratiqués sur un faible nombre d'individus musiciens et ne pratiquant pas tous le même instrument, un consensus se confirme néanmoins sur le fait que de très nombreux bénéfices peuvent être obtenus par le développement de compétences musicales non seulement chez les sujets « sains », mais également dans la perspective de la prise en charge de certains handicaps. Ainsi, de nombreuses pratiques cliniques ont découlé de la diffusion de ces nouvelles connaissances en neurosciences, bien que souvent l'impact des bénéfices imputables à la musique ne soit pas toujours directement quantifiable (O'Kelly, 2016).

Bibliographie

- ALTENMÜLLER, E. *et al* (2009) : « Neural reorganization underlies improvement in stroke-induced motor dysfunction by music-supported therapy ». *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169, 395-405.
- ALWORTH, L.C. and BUERKLE, S. (2013) : « The effects of music on animal physiology, behavior and welfare ». *LabAnimal*, 42 (2), pp. 54-61.
- AMUNTS, K. *et al*. (1997) : « Motor cortex and hand motor skills: structural compliance in the human brain ». *Human Brain Mapping*, 5 (3), pp. 206-215.
- ANGELUCCI, F. *et al*. (2007) : « Music exposure differentially alters the levels of brain-derived neurotrophic factor and nerve growth factor in the mouse hypothalamus ». *Neuroscience Letters*, 429 (2-3), pp. 152-155.
- BANGERT, M. and ALTENMÜLLER, E.O. (2003) : « Mapping perception to action in piano practice: a longitudinal DC-EEG study ». *BMC Neuroscience*, 4 (26), pp. 1-14.
- BANGERT, M. and SCHLAUG, G. (2006) : « Specialization of the specialized in features of external human brain morphology ». *European Journal of Neuroscience*, 24 (6), pp. 1832-1834.
- BERMUDEZ, P. and ZATORRE, R.J. (2005) : « Differences in gray matter between musicians and nonmusicians ». *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060, pp. 395-399.
- BESSON, M. *et al*. (2007) : « Influence of musical expertise and musical training on pitch processing in music and language ». *Restorative Neurology and Neuroscience*, 25 (3-4), pp. 399-410.
- BESSON, M. *et al*. (2011) : « Transfer of training between music and speech: common processing, attention, and memory ». *Frontiers in Psychology, Auditory Cognitive Neuroscience*, 2 (94), pp. 1-12.
- BODDAERT, N. *et al*. (2009) : « MRI findings in 77 children with non-syndromic autistic disorder ». *PLoS One*, 4(2), pp. e4415-e4422. doi: 10.1371/journal.pone.0004415.
- BROWN, S. and MARTINEZ, M.J. (2007) : « Activation of premotor vocal areas during musical discrimination ». *Brain and Cognition*, 63 (1), pp. 59-69.
- BRYANT, G.A. (2013) : « Animal signals and emotion in music: coordinating affect across groups ». *Frontiers in Psychology*, 4, 990, pp.1-13.
- CASON, N. *et al*. (2015) : « Bridging music and speech rhythm: rhythmic priming and audio-motor training affect speech perception ». *Acta Psychologica*, 155, pp. 43-50.
- CHANDA, M.L. and LEVITIN, D.J (2013) : « The neurochemistry of music », *Trends in Cognitive Sciences* 17 (4), pp. 179-193.
- CHASTE, P. *et al*. (2012) : « Autism risk factors: genes, environment, and gene-environment interactions ». *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 14 (3), pp. 281-292.
- CHEN, J.L. *et al*. (2006) : « Interactions between auditory and dorsal premotor cortex during synchronization to musical rhythm ». *Neuro Image*, 32 (4), pp. 1771-1781.

CHEN, R. *et al.* (2011) : « Structural MRI in autism spectrum disorder ». *Pediatric Research*, 69, pp. 63R-68R.

CHOBERT, Julie *et al.* (2014) : « Twelve months of active musical training in 8- to 10-year-old children enhances the preattentive processing of syllabic duration and voice onset time ». *Cerebral Cortex* 24 (4), pp 956–967.

CHOBERT, Julie, DITTINGER, Eva & BESSON, Mireille (2014) : « Influence de l'apprentissage musical sur la perception et la compréhension du langage. » Laboratoire de Neurosciences Cognitives, Marseille :

irmfmrs.free.fr/Uploads/RMN2014/RMN_18Sept2014_Besson.pdf

CLARK, J.F. and CECIL, K.M. (2015) : « Diagnostic methods and recommendations for the cerebral creatine deficiency syndromes ». *Pediatric Research*, 77 (3), pp. 398-405.

CLES CEA (2007- 2008), n°56 RMN, magnétisme et santé. Les Progrès de la magnétoencéphalographie. www.histrecmed.fr/images/MEG.pdf

DEFELIPE, J. (2002) : « History of Neuroscience: Santiago Ramón y Cajal (1852-1934) », IBRO History of Neuroscience <http://www.ibro.info>.

DICHTER, G.S. (2012) : « Functional magnetic resonance imaging of autism spectrum disorders ». *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 14(3), pp. 319-351.

DUCOURNEAU, G. (2014) : *Éléments de musicothérapie*, 2^e édition, p. 8, « Psychothérapies » Dunod, Paris, France.

DOUPE, A.J. and KUHL, P.K. (1999) : « Birdsong and human speech: common themes and mechanisms ». *Annual Reviews Neuroscience*, 22, pp. 567-631.

ELBERT, T. *et al.* (1995) : « Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players ». *Science*, 270(5234), pp. 305-307.

ELBERT, T. *et al.* (1995) : « Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players ». *Science*, 270(5234), pp. 305-307.

FLAUGNACCO, E. *et al.* (2015) : « Music training increases phonological awareness and reading skills in developmental dyslexia: a randomized control trial ». *PLoS ONE*, 10, e0138715. doi:10.1371/journal.pone.0138715.

FUKUI, H. and TOYOSHIMA, K. (2008) : « Music facilitate the neurogenesis, regeneration and repair of neurons ». *Medical Hypotheses*, 71 (5), pp. 765-769.

GASER, C. and SCHLAUG, G. (2003) : « Brain structures differ between musicians and non-musicians ». *Journal of Neuroscience*, 23 (27), pp. 9240-9245.

GERETSEGGER, M. *et al.* (2014) : « Music therapy for people with autism disorder (Review) ». *Cochrane Database of Systematic Reviews 2014*, issue 6. Art.N.:CD004381. doi: 10.1002/14651858.CD004381.pub3.

GOOD, M. *et al.* (2001) : « Relaxation and music to reduce postsurgical pain ». *Journal of Advanced Nursing*, 33(2), pp. 208-215.

GÖTELL, E. *et al.* (2009) : « The influence of caregiver singing and background music on vocally expressed emotions and moods in dementia care: A qualitative analysis ». *International Journal of Nursing Studies*, 46 (4), pp 422-430.

GRANT, M. D. and BRODY, J. A. (2004) : « Musical experience and dementia. Hypothesis ». *Aging Clinical and Experimental Research*, 16 (5), pp 403-405.

GREENWOOD, P. M. (2007). « Functional plasticity in cognitive aging: review and hypothesis. » *Neuropsychology*, 21 (6), pp. 657-673.

GROSSARD, M. *et al.* (2010) : « When music and long-term memory interact: effects of musical expertise on functional and structural plasticity in the hippocampus ». *PLoS ONE*, 5 (10), pp. e13225-13233. doi:10.1371/journal.pone.0013225

GUÉTIN, S. *et al.* (2009) : « Effect of music therapy on anxiety and depression in patients with Alzheimer's type dementia: randomised, controlled study ». *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 28 (1), pp 36-46.

HABIB, M. and BESSON, M. (2008) : « Langage, musique et plasticité cérébrale: perspectives pour la rééducation ». *Revue de Neuropsychologie*, 18(1-2), pp. 103-126.

HABIB, M. (2009) : « Développement de la dominance cérébrale: revue des données disponibles et proposition d'une hypothèse originale » *Développements*, 2 (2), pp. 5-26.

HAGNER, Mickael (2008) : *Des cerveaux de génie. Une histoire de la recherche sur les cerveaux d'élite*, Éditions de la Maison des sciences de l'homme.

HAN, X. *et al.* (2013) : « Forebrain engraftment by human glial progenitor cells enhances synaptic plasticity and learning in adult mice ». *Cell Stem Cell*, 12 (3), pp 3642-353.

HANNON, E.E. and TRAINOR, L.J. (2007) : « Music acquisition: effects of enculturation and formal training on development ». *Trends in Cognitive Sciences*, 11 (11), pp. 466-472.

HEATON, P. (2003) : « Pitch memory, labelling and disembedding in autism ». *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 44 (4), pp. 543-551.

HEFFNER, H.E. and HEFFNER, R.S. (2001) : « Behavioral assessment of hearing in mice ». In J.F. Willott (Ed.) *Handbook of Mouse Auditory Research : From Behavior to Molecular Biology*, pp. 19-29. CRC Press: Boca Raton FL. USA.

HERDENER, M. *et al.* (2010) : « Musical training induces functional plasticity in human hippocampus ». *Journal of Neuroscience*, 30 (4), pp. 1377-1384.

HOLMES, C. *et al.* (2006) : « Keep music live: Music and the alleviation of apathy in dementia subjects », *International Psychogeriatrics*, 18(4), pp. 623-630.

- HOUDE, Olivier, MAZOYER, Bernard & TZOURIO-MAZOYER, Nathalie (Eds) (2002) : « Introduction à l'imagerie cérébrale anatomique et fonctionnelle », in *Cerveau et Psychologie. Introduction à l'imagerie cérébrale anatomique et fonctionnelle*, Paris, Presses Universitaires de France.
- HUANG, S-T. *et al.* (2010) : « The effectiveness of music in relieving pain in cancer patients: A randomized controlled trial ». *International Journal of Nursing Studies*, 47 (11), pp. 1354-1362.
- HUANG, Z. *et al.* (2010) : « Verbal memory retrieval engages visual cortex in musicians ». *Neuroscience*, 168, pp. 179-189.
- HUTCHINSON, S. *et al.* (2003) : « Cerebellar volume of musicians ». *Cerebral Cortex*, 13 (9), pp. 943-949.
- HYDE, K.L. *et al.* (2009) : « Musical training shapes structural brain development ». *Journal of Neuroscience*, 29 (10), pp. 3019-3025.
- JÄNCKE, L. *et al.* (1997) : « Hand skill asymmetry in professional musicians ». *Brain and Cognition*, 34 (3), pp. 424-432.
- KANDURI, C. *et al.* (2015) : « The effect of listening to music on human transcriptome ». *PeerJ*, 3:e830; DOI 10.7717/peerj.830.
- KOELSCH, S. *et al.* (2006) : « Investigating emotion with music: an fMRI study ». *Human Brain Mapping*, 27 (3), pp 239-250.
- KRAUS, D. and CHANDRASEKARAN, K. (2010) : « Music training for the development of auditory skills ». *Nature Reviews. Neuroscience*, 11 (8), pp. 599-605.
- LEAVER, A.M. and RAUSCHECKER, J.P. (2010) : « Cortical representation of natural complex sounds: effects of acoustic features and auditory object category ». *Journal of Neuroscience*, 30 (22), pp. 7604-7612.
- LECHEVALIER, Bernard, PLATEL, Hervé & EUSTACHE, Francis (2010) : *Le Cerveau Musicien : Neuropsychologie et psychologie cognitive de la perception musicale*. Éd. De Boeck. <https://www.cairn.info/le-cerveau-musicien--9782804162801.htm>
- LEE, D.J. *et al.* (2003) : « Corpus callosum: musician and gender effects ». *Neuroreport*, 14 (2), pp. 205-209.
- LEMARQUIS, Pierre (2009) : *Sérénade pour un cerveau musicien*. Paris, Odile Jacob.
- LIM, I. *et al.* (2005) : « Effects of external rhythmical cueing on gait in patients with Parkinson's disease: A systematic review ». *Clinical Rehabilitation*, 19 (7), pp. 695-713.
- MAGEE, W.L. *et al.* (2017) : « Music interventions for acquired brain injury ». *Cochrane Database of Systematic Reviews 2017*, issue 1. Art.N° CD006787. doi: 10.1002/14651858.CD006787.pub3.
- MARQUES, C. *et al.* (2007) : « Musicians detect pitch violation in a foreign language better than nonmusicians: behavioral and electrophysiological evidence ». *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19 (9), pp. 1453-1463.

- MORENO, S. *et al.* (2009) : « Musical training influences linguistic abilities in 8-year-old children: more evidence for brain plasticity ». *Cerebral Cortex*, 19 (3), pp. 712-723.
- MUSACCHIA, G. *et al.* (2007) : « Musicians have enhanced subcortical auditory and audiovisual processing of speech and music ». *Proceedings of the National Academy of Science*, 104 (40), pp. 15894-15898.
- NADEL, J. (2005) : « Imitation et autisme ». *Mep Autisme*, pp. 341-356.
- NAKAMURA, T. *et al.* (2007) : « Auditory stimulation affects renal sympathetic nerve activity and blood pressure in rats ». *Neuroscience Letters*, 416 (2), pp. 107-112.
- NIEHUES DE CRUZ, J. *et al.* (2011) : « The power of classic music to reduce anxiety in rats treated with simvastatin ». *Basic and Clinical Neuroscience*, 2 (4), pp. 5-11.
- O'KELLY, J. *et al.* (2016) : « Editorial: Dialogues in music therapy and music neuroscience: Collaborative understanding driving clinical advances ». *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, Article 585, pp. 1-4. doi:[10.3389/fnhum.2016.00585](https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00585)
- O'RIORDAN, M. and PASSETI, F. (2006) : « Discrimination in autism within different sensory modalities ». *Journal of Autism Development Disorders*, 36(5), pp. 665-675.
- OVERY, K. (2003) : « Dyslexia and Music. From timing deficits to musical intervention ». *Annals of the New York Academy of Science*, 999, pp. 497-505.
- PANTEV, C. *et al.* (1999) : « Short-term plasticity of the human auditory cortex ». *Brain Research*, 842(1), pp. 192-199.
- PANTEV, C. *et al.* (2003) : « Music and learning-induced cortical plasticity ». *Annals of the New York Academy of Science*, 999, pp. 438-450.
- PANTEV, C. and Herholz, S.C. (2011) : « Plasticity of the human auditory cortex related to musical training ». *Neuroscience and Behavioral Reviews*, 35 (10), pp. 2140-2154.
- PATEL, A.D. (2010) : « Music, biological evolution, and the brain ». In M. Bailar (Ed.) 2010, *Emerging Disciplines* (pp. 91-144). Houston: TX: Rice University Press.
- PLATEL, H. and GROUSSARD, M. (2010) : « La mémoire sémantique musicale: apport des données de la neuropsychologie clinique et de la neuro-imagerie fonctionnelle ». *Revue de Neuropsychologie*, 2, pp. 61-69. doi: 10.3917/me.021.0061
- RICKARD, N.S. *et al.* (2005) : « The effect of music on cognitive performance: insight from neurobiological and animal studies ». *Behavioral and Cognitive Neuroscience Review*, 4(4), pp. 235-261.
- RICKARD, N.A. *et al.* (2013) : « A computer-based auditory sequential pattern test for school-aged children ». *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 77, pp. 838-842.
- SAITOVICH, A. *et al.* (2012) : « Social cognition and the superior temporal sulcus: implications in autism ». *Revue Neurologique*, 168(10), pp. 762-770.

SAKAMOTO, M. *et al.* (2013) : « Comparing the effects of different individualized music interventions for elderly individuals with severe dementia ». *International Psychogeriatrics*, 25 (5), pp. 775-784.

SÄRKÄMO, T. *et al.* (2014) : « Structural changes induced by daily music listening in the recovery brain after middle cerebral artery stroke: a voxel-based morphometry study ». *Frontiers in Neuroscience*, 8, 245, pp. 1-16.

SATOH, M. and KUZUHARA, S. (2008) : « Training in mental singing while walking improves gait disturbance in Parkinson's disease patients ». *European Neurology*, 60 (5), pp. 237-243.

SCHLAUG, G. *et al.* (1995a) : « In vivo evidence of structural brain asymmetry in musicians ». *Science*, 267, pp. 699-701.

SCHLAUG, G. *et al.* (1995b) : « Increased corpus callosum size in musicians ». *Neuropsychologia*, 33 (8), pp. 1047-1055.

SCHNEIDER, P. *et al.* (2002) : « Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians ». *Nature Neuroscience*, 5 (7), pp. 688-694.

SCHNEIDER, S. *et al.* (2007) : « Using musical instruments to improve motor skill recovery following a stroke ». *Journal of Neurology*, 254 (10), pp.1339-1346.

SCHÖN, Daniele (2015) : « Musique, Langage et plasticité du cerveau. », <http://www.afirme.org/daniele-schon-musique-langage-et-plasticite-du-cerveau/>

SLUMING, V. *et al.* (2002) : « Voxel-based morphometry reveals increased gray matter density in Broca's area in male symphony orchestra musicians ». *Neuro Image*, 17 (3), pp. 1613-1622.

SPIILKA, M. J. *et al.* (2010) : « Gesture imitation in musicians and non-musicians ». *Experimental Brain Research*, 204 (4), pp. 549-558.

STEWART, Lauren (2008) : « Do musicians have different brains ? ». *Medicine, Music and the Mind : Clinical Medicine*, 8, pp. 304-308.

<https://pdfs.semanticscholar.org/b097/ad4e7c02cfb1c22eeac2d08fc3139ba74de5.pdf>

STIRLING, John and ELLIOTT, Rebecca (Ed.) (2007) : « Introducing Neuropsychology » in *Methods in neuropsychology* , 2nd Edition. pp. 21-39. Psychology Press, Taylor & Francis Group: New York, USA.

STRAIT, D.L. *et al.* (2012) : « Musical training during early childhood enhances the neural encoding of speech in noise ». *Brain & Langage*, 123 , pp. 191-201.

SUTOO, D. and Akiyama, K. (2004) : « Music improves dopaminergic neurotransmission based on the effect of music on blood pressure regulation ». *Brain Research*, 1016(2), pp. 255-262.

SVANSDOTTIR, H.B. and SNAEDAL, J. (2006) : « Music therapy in moderate and severe dementia of Alzheimer's type: a case-control study ». *International Psychogeriatrics*, 18 (4), pp 613-621.

THAUT, M.H. *et al.* (1996) : « Rhythmic auditory stimulation in gait training for Parkinson's disease patients ». *Movement disorders*, 11 (2), pp. 193-200.

- THAUT, M.H. *et al.* (2001) : « Auditory rhythmicity enhances movement and speech motor control in patients with Parkinson's disease ». *Functional Neurology*, 16 (2), pp. 163-172.
- THOMPSON, W.F. *et al.* (2003) : « Perceiving prosody in speech. Effects of music lessons ». *Annals of the New York Academy of Science*, 999, pp. 530-532.
- TORDJMAN, S. (2005) : « Des résultats de l'imagerie cérébrale dans l'autisme à leur interprétation », *Le Carnet PSY*, 2005/2 (n°97), pp. 24-26.
- TREVARTHEN, C. (2005) : « Autisme, motivation en résonance et musicothérapie » *Neuropsychiatrie de l'enfance et de l'adolescence*, 53, pp. 46-53.
- TSUNADA, J. *et al.* (2011) : « Representation of speech categories in the primate auditory cortex ». *Journal of Neurophysiology*, 105(6), pp. 2634-2646.
- VAUCHER, Carla (2014) : *La musique comme fonction biologique*. <https://www.espacestemps.net>
- WAN, C.Y. and SCHLAUG, G. (2010) : « Music making as a tool for promoting brain plasticity across the life span ». *The Neuroscientist*, 16 (5), pp. 566-577.
- WANG, C-F. *et al.* (2014) : « Music therapy improves sleep quality in acute and chronic sleep disorders: A meta-analysis of 10 randomized studies ». *International Journal of Nursing Studies*, 51, pp. 51-62.
- ZATORRE, R. J. *et al.* (2007) : « When the brain plays music: auditory-motor interactions in music perception and production ». *Nature Reviews. Neuroscience*, 8, pp. 547-558.
- ZILBOVICIUS, M. *et al.* (2013) : « Autism, social cognition and superior temporal sulcus ». *Open Journal of Psychiatry*, 3(2), pp. 46-55.