

Langage, musique et plasticité cérébrale : perspectives pour la rééducation

Michel Habib^{1,2}, *Mireille Besson*¹

(1) Institut de Neurosciences Cognitives de la Méditerranée, CNRS & Université de la Méditerranée

(2) Service de Neurologie Pédiatrique, C.H.U. Timone, Marseille

Résumé

Cet article résume les principales preuves acquises à ce jour concernant les liens entre le cerveau et la musique, en tant qu'aptitude humaine mais aussi en tant que activité mentale apte à modifier l'organe qui la crée. L'expertise musicale, nécessairement liée à un apprentissage le plus souvent précoce et intensif, est associée à des particularités neuroanatomiques qui ont pu être révélées grâce aux moyens modernes de neuroimagerie, en particulier l'IRM. Ces particularités concernent plusieurs régions toutes impliquées soit dans le contrôle moteur du geste (donc probablement en rapport avec la pratique instrumentale) soit dans les fonctions auditivo-perceptives. Tout laisse également à penser que l'apprentissage de la musique possède des effets plus généraux sur la plasticité cérébrale, comme le démontrent des travaux retrouvant des capacités d'apprentissage accrues chez des musiciens. Une notion importante à cet égard est l'existence d'une probable "période critique" autour de l'âge de 7 ans, au-delà de laquelle à la fois les modifications structurelles induites par la musique sont moins visibles et les effets d'apprentissage moins prononcés. Les implications de ces données sont discutées avec comme perspective l'utilisation de l'entraînement musical chez des enfants souffrant de troubles spécifiques d'apprentissage du langage et de la lecture.

Correspondance : Service de Neurologie Pédiatrique, CHU Timone-enfants, 13385
Marseille cedex 5, FRANCE
e-mail : michel.habib@univmed.fr

Mots-clés: Apprentissage, Cerveau, Dyslexie, IRM, Langage, Musicien, Musique, Plasticité, Potentiels évoqués, Rééducation.

Key words : Brain, Dyslexia, Evoked potentials, Language, Learning, MRI, Music, Musician, Plasticity, remediation

INTRODUCTION

Cela ne fait guère plus de 25 ans que les neurologues et les neuroscientifiques ont commencé à étudier le cerveau des musiciens, un domaine qui s'avère chaque jour plus fascinant, mais également plus complexe. A l'évidence, les musiciens représentent une population très particulière, non seulement par le fait de leur pratique d'un instrument de musique (ce qui, on en a maintenant de nombreuses preuves, influence considérablement leur organisation cérébrale), mais aussi et surtout par le fait qu'ils ont très généralement débuté leur apprentissage très précocement durant l'enfance, ce qui en fait un précieux modèle pour approcher les mécanismes de l'apprentissage et de la plasticité cérébrale. L'un des principaux aspects qui seront abordés dans cet article concernera les particularités morphologiques du cerveau de musiciens professionnels, et nous verrons comment mieux connaître le cerveau du musicien peut apporter de précieux enseignements quant à l'influence du milieu et plus généralement de l'« expérience » sur la morphologie cérébrale. La seconde partie de l'article est consacrée à la question générale de « ce qui change dans le cerveau quand on apprend la musique », se basant en particulier sur les données issues des techniques d'imagerie fonctionnelle du cerveau, obtenues chez l'enfant et l'adulte lors d'apprentissage de la musique. Enfin, dans la dernière partie, nous envisagerons comment les connaissances actuelles peuvent suggérer l'utilisation de l'apprentissage musical en guise de remédiation du cerveau dysfonctionnel, comme chez l'enfant souffrant de troubles d'apprentissage du langage.

I/ LE CERVEAU DE L'ADULTE MUSICIEN : COMMENT ET COMBIEN EST-IL DIFFÉRENT D'UN CERVEAU « ORDINAIRE »

Les musiciens professionnels sont doublement intéressants pour le neuroscientifique : en premier lieu, tous les musiciens exercent et ont exercé de manière intensive et prolongée les mécanismes moteurs requis par l'exercice de leur instrument, mécanismes parfois spécifiques à une main, voire à certains doigts de la main. C'est ainsi que Elbert et al. (1995) ont été parmi les premiers à apporter la démonstration d'une surface de cortex cérébral plus vaste dans la région corticale sensori-motrice des deux derniers doigts de la main gauche, donc sur l'hémisphère droit chez des violonistes, ce qui a été naturellement rapporté au rôle tout particulier de ces deux doigts dans la pratique de cet instrument. Un argument de poids à cet égard fut la constatation que cette différence s'avérait d'autant plus nette que l'apprentissage de l'instrument avait été débuté plus tôt durant l'enfance (alors qu'elle était moins nette chez ceux qui avaient appris à jouer de l'instrument à l'âge adulte), ce qui renforçait l'idée d'une période de plasticité maximale durant l'enfance. En outre, et cette fois-ci de façon moins spécifique au type d'instrument appris, ils exercent également de manière intensive leurs capacités de discrimination auditive de sorte que tant sur le plan sensori-moteur qu'auditivo-perceptif, leur étude est susceptible de nous apprendre jusqu'à quel point l'expérience d'un apprentissage spécifique peut modifier, de façon parfois durable, la structure même du cerveau. Une étude en Magnétoencéphalographie (Schneider et al., 2002) a ainsi démontré que chez des musiciens, comparés à des non musiciens, le volume de substance grise de l'aire auditive primaire (gyrus de Heschl) était plus vaste de 130%. S'agissant de l'influence de l'exercice moteur sur le cerveau des musiciens, l'une des toutes premières constatations fut celle de Schlaug et al. (1995a) d'une différence de taille du corps calleux en faveur des musiciens par rapport à des non musiciens, ce qui suggérait également que cela fût le résultat de la pratique répétée et intensive d'une activité où la collaboration interhémisphérique est par-

ticulièrement nécessaire, pour assurer la coopération des deux mains dans la performance instrumentale, d'autant que c'était sur la partie antérieure du corps calleux que les différences étaient les plus significatives. Cependant, ces différences n'étaient significatives que pour les musiciens qui avaient débuté la pratique de leur instrument avant l'âge de 7 ans, ce qui suggérait que cet effet ne pouvait survenir que pendant les périodes d'intense plasticité cérébrale. Plus tard, la même équipe a démontré que cette différence concernant le corps calleux était liée au sexe, et donc probablement soumise à l'influence de facteurs hormonaux, car la différence ne fut plus observée sur une population de musiciennes (Lee et al., 2003).

Une telle période critique pour l'influence de l'entraînement musical sur la morphologie cérébrale a également été mise en évidence pour une autre région du cerveau du musicien, située à proximité du cortex auditif, le « Planum temporale », une aire corticale dont le rôle présumé est d'intégrer les multiples dimensions des stimuli acoustiques en une information cohérente susceptible d'être ensuite traitée du point de vue sémantique. Une caractéristique largement reconnue du Planum temporale est d'être notablement asymétrique en faveur de l'hémisphère gauche, au moins chez les droitiers, ce qui n'a pas manqué d'être rapproché de la dominance de l'hémisphère gauche pour le langage (Witelson & Kigar, 1992). Plusieurs études ont démontré que cette asymétrie est modifiée chez les musiciens, dans le sens où les musiciens présenteraient une asymétrie plus prononcée en faveur de l'hémisphère gauche que les non-musiciens (Schlaug et al., 1995b ; Zatorre et al., 2002). En outre, cet effet serait particulièrement prononcé chez les musiciens ayant cette caractéristique très particulière qu'on appelle l'oreille absolue¹, caractéristique réputée présente chez les seuls musiciens ayant commencé la musique avant l'âge de 7 ans (Schlaug, 2001). Par conséquent, une augmentation de l'asymétrie à gauche du cortex auditif associatif et son corrélat,

¹ **L'oreille absolue**, par opposition à l'oreille relative, est la faculté pour quelqu'un de pouvoir identifier une note musicale en l'absence de référence. En Occident, seule une personne sur 10 000 serait dotée d'une oreille absolue « active », c'est-à-dire serait capable de chanter sans repère une note correcte.

l'oreille absolue, seraient deux manifestations distinctes mais reliées de l'effet sur le cerveau de musiciens de la pratique intensive d'une association audio-verbale entre une hauteur fréquentielle spécifique et le nom de la note qui lui correspond. Keenan et al. (2001) ont démontré que des musiciens ayant l'oreille absolue diffèrent de non musiciens par la taille non du planum gauche, mais du planum droit. En d'autres termes, un planum droit de taille plus réduite chez les musiciens possédant l'oreille absolue pourrait être interprété comme traduisant des variations d'élagage neuronal (« pruning »), un processus qui survient principalement durant le développement cortical pré-natal.

D'un tout autre point de vue, Bermudez et Zattore (2005), dans une étude utilisant la VBM (« voxel-based morphometry ») (donc ayant éliminé le biais possible induit par l'analyse de régions a priori), ont retrouvé une différence maximale de densité de substance grise dans une petite région latérale du planum temporel droit, une région susceptible d'être impliquée dans la discrimination de hauteur. Comme aucune différence ne fut retrouvée entre les musiciens jouissant ou non de l'oreille absolue, les résultats ont donc été interprétés comme témoignant de l'effet de l'expérience musicale sur la morphologie de cette région du cerveau, plutôt que comme témoignant d'une quelconque prédisposition. À l'aide d'une méthode similaire de VBM, Gaser et Schlaug (2003) ont comparé des joueurs de clavier professionnels à des non musiciens de même qu'à des joueurs amateurs. Ils ont retrouvé plusieurs régions appartenant à la fois aux aires sensorimotrices et à des régions préfrontales antérieures et cérébelleuses gauches possédant une plus forte densité de substance grise chez les joueurs professionnels comparé aux amateurs et aux non musiciens. Dans la mesure où les professionnels rapportaient passer deux fois plus de temps en moyenne sur leur instrument que les amateurs, cela suggère que les différences morphologiques observées sont bien les conséquences directes de l'expérience sensori-motrice avec leur instrument.

Parmi les développements récents de l'imagerie cérébrale, une autre technique semble particulièrement appropriée à cette problématique,

l'imagerie par diffusion de tenseur (DTI). Cette technique permet un traçage très fin et très fidèle du trajet des faisceaux d'axones constitutifs de la matière blanche sous-corticale, permettant ainsi de suivre la direction exacte des diverses connexions entre des régions cérébrales distantes. Lors d'une étude de ce type, Schmithorst & Milke (2002) ont retrouvé une augmentation de la densité et de l'orientation des fibres (anisotropie) dans la région calleuse antérieure, suggérant un effet de l'activité intermanuelle, impliquée dans la pratique de tout instrument, sur la conformation des fibres interhémisphériques (à l'instar de l'étude sus-citée de Schlaug, 1995), mais aussi une plus faible anisotropie dans les faisceaux pyramidaux, suggérant une moindre utilisation des faisceaux cortico-spinaux en raison de l'automatisation de la fonction. De même, Bengtsson et al. (2005) ont également démontré que telles différences en matière d'organisation des faisceaux sont proportionnelles à la durée de la pratique (en heures par jour), même chez des enfants de moins de 11 ans. Enfin, il n'est pas sans intérêt de remarquer que l'anatomie du sillon central, situé juste en arrière de l'aire motrice primaire, pourrait être prédictive du type d'instrument joué par un musicien donné (Bangert & Schlaug, 2006). En particulier, la partie moyenne du sillon, qui présente habituellement une courbure en forme de Oméga (« signe de l'oméga »), est plus symétrique chez les joueurs de clavier, dont la dextérité concerne les deux mains de façon égale, que chez les joueurs d'instruments à cordes, où le signe de l'oméga est seulement visible sur l'hémisphère droit (figure 1), témoignant d'une asymétrie plus nette de l'étendue des aires corticales en regard. Ces résultats méritent cependant d'être confirmés.

En résumé, les données rapportées ci-dessus, et schématisées sur la figure 2, suggèrent que les musiciens professionnels représentent une population neurologiquement spécifique, possédant des différences macroscopiquement détectables de leur morphologie cérébrale, et que ces différences concernent à la fois des structures motrices (cortex moteur et pré-moteur, partie antérieure du corps calleux, cervelet) et des structures

Figure 1 : le "signe de l'oméga" témoignant du plus fort développement de la représentation motrice de la main gauche chez des joueurs d'instruments à cordes (a) par rapport à des joueurs d'instruments à clavier (b) où le pattern est plus proche de celui retrouvé dans la population générale (légèrement asymétrique en faveur du côté gauche)

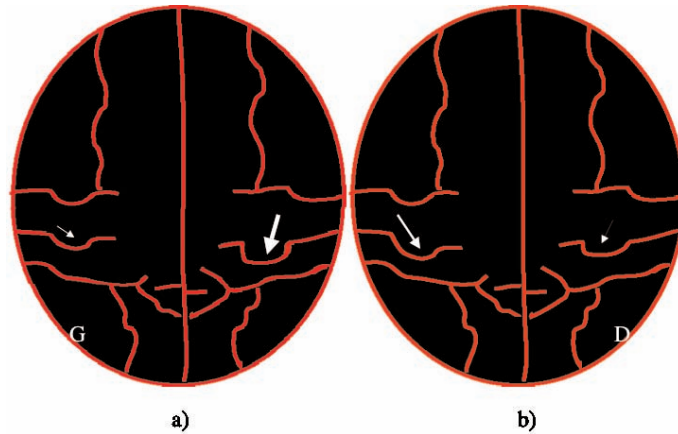


Figure 1 : "omega sign" suggesting larger development of the left hand motor area in string players (a) compared to keyboard players (b) where interhemispheric pattern is closer to that found in the general population (slight left-sided predominance).

Figure 2 : représentation synthétique des différentes particularités morphologiques retrouvées sur le cerveau de musiciens. IF : gyrus frontal inférieur; M(h): représentation motrice de la main; S(h): représentation somesthésique de la main; SP: lobule pariétal supérieur; PT: planum temporal; HG : gyrus de Heschl; IT : cortex inféro-temporal

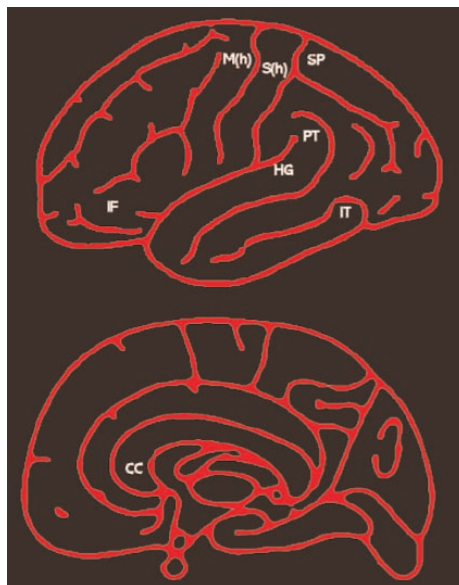


Figure 2 : synthetic representation of distinctive morphological features of the musician's brain.

liées à la perception auditive (gyrus de Heschl, Planum temporale). Certaines de ces différences sont clairement en lien avec l'expertise musicale, d'autres non. La plupart sont, lorsque cette information est disponible, proportionnelles à la durée de la pratique musicale. Des faisceaux particuliers de substance blanche, appartenant principalement à des circuits moteurs, ont été retrouvés différemment structurés chez les musiciens, y compris chez des enfants avant l'âge de 11 ans.

II/ APPRENDRE LA MUSIQUE : CE QUE CELA CHANGE DANS LE CERVEAU

Comme il a été montré dans la section précédente, il y a à présent un faisceau d'arguments considérable prouvant que la pratique musicale provoque des effets profonds et durables sur le cerveau, mais cela nous informe peu sur ce qui se passe réellement dans le cerveau durant l'entraînement musical lui-même. Diverses données expérimentales, principalement obtenues chez l'animal, ont fourni des indications sur les bases neurales de tels effets. D'une manière générale, la pratique répétée optimise les circuits neuronaux en modifiant le nombre de neurones impliqués, le degré de synchronisation temporelle et le nombre et la force des connexions synaptiques excitatrices et inhibitrices. Ces effets de l'apprentissage perceptif ont été observés en électrophysiologie animale sur divers systèmes sensoriels : visuel, somesthésique et auditif (Edeline, 1999 ; Weinberger, 2004). Anatomiquement, l'entraînement intensif quotidien à des tâches sensori-motrices chez le singe modifie les cartes fonctionnelles cérébrales (Jenkins et al., 1990). Dans la modalité auditive, des animaux entraînés de manière comportementale présentent une augmentation de l'organisation tonotopique de leur cortex auditif primaire (Recanzone et al., 1993). La simple exposition à un environnement acoustique enrichi hors de tout entraînement conventionnel augmente les réponses auditives corticales et affine le « réglage » (tuning) des neurones auditifs, même pour des sons nouveaux chez des animaux jeunes comme âgés (Engineer et al., 2004), et ce pour des durées pouvant aller jusqu'à

plusieurs jours. En résumé, ces différentes études montrent que l'entraînement et même le seul environnement auditif possèdent un impact complexe mais incontestable sur le système auditif.

Grâce à la méthode des potentiels évoqués, plusieurs auteurs ont investigué les corrélats de l'apprentissage de la musique chez l'enfant. Il a ainsi été retrouvé une augmentation des réponses P100, N150 et P200 à des tons joués au piano, chez des enfants prenant des leçons de piano comparés à des témoins non musiciens (Shahin et al., 2004). De même, utilisant la magnétoencéphalographie, Pantev et al. (1998; 2001) ont retrouvé une augmentation de la représentation corticale pour des tons de l'échelle musicale, comparé à des tons purs, chez des musiciens expérimentés. Cette augmentation de surface corticale était corrélée à l'âge auquel les musiciens avaient commencé leur pratique. Ils ont aussi étudié la représentation corticale pour des notes de différents timbres, et retrouvé que celle-ci est plus vaste chez les violonistes et les trompettistes, préférentiellement pour le timbre de l'instrument que le musicien pratiquait.

Utilisant cette fois-ci l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), Jäncke et al. (2001) ont mesuré les réponses hémodynamiques induites par des séquences de tons purs de 950 Hz (standard), et des tons déviants de 952, 954, et 958 Hz avant et une semaine après que les sujets eurent été entraînés à la discrimination fréquentielle pendant 5 sessions sur une semaine. La moitié des sujets amélioraient leur discrimination après l'entraînement : la comparaison, chez ces sujets qui ont répondu à l'entraînement, de l'activation cérébrale avant et après entraînement a résulté en l'activation d'une aire bilatérale dans le gyrus temporal supérieur suggérant une réorganisation plastique de la représentation corticale pour les fréquences entraînées.

Une considération importante quant aux effets cérébraux de l'entraînement musical est la notion de période critique, généralement fixée autour de 7 ans, au-delà desquels, au moins anatomiquement, l'entraînement peut ne pas avoir un effet aussi fort et/ou aussi durable. Cette question a été examinée par Watanabe et al. (2007), qui ont testé des musiciens adultes ayant commencé leur apprentissage avant et après l'âge de 7 ans

dans une tâche d'apprentissage d'une séquence motrice rythmique. Les résultats ont montré que les musiciens ayant commencé tôt ont de meilleures performances que ceux ayant commencé tard leur apprentissage de la musique et que cet avantage persistait après 5 jours de pratique. Les différences de performances étaient plus importantes sur une mesure de synchronisation de la réponse, suggérant que l'entraînement précoce a ses plus nets effets sur les systèmes neuraux impliqués dans l'intégration sensori-motrice et le timing. Ces constatations sont en faveur de l'hypothèse d'une période sensible dans l'enfance où un entraînement moteur enrichi par une pratique musicale a des conséquences positives et durables sur les performances plus tard dans la vie, même dans des domaines non musicaux de l'apprentissage.

Un aspect intéressant de cette intégration sensori-motrice a été rapporté par Bangert et Altenmüller (2003) qui ont démontré qu'un entraînement de 20 mn chez des apprentis joueur de clavier, est suffisant pour provoquer des représentations inter-modales durables, rejoignant des observations antérieures de Pascual-Leone et al. (1995). En outre, un tel couplage sensori-moteur inter-modal a lieu même à un niveau inconscient, pré-cognitif (Bangert et al., 2006). Récemment, Fujioka et al. (2006) se sont penchés sur la question de savoir si un entraînement musical chez des enfants de 4 à 6 ans pouvait affecter durablement l'organisation cérébrale. Pour ce faire, ils ont enregistré les potentiels magnétiques cérébraux en utilisant une technique MEG avant et après un entraînement par la fameuse méthode Suzuki. Un effet clair de l'entraînement fut révélé par un pic N250 plus large et plus précoce en réponse au son de violon chez les enfants entraînés musicalement. Plus récemment, Moreno et al. (2008) ont pu générer des modifications dans les patrons de réponse électrophysiologique chez des enfants de 8 ans après 6 mois de pratique, effet similaire à ceux obtenus précédemment chez des enfants musiciens de 8 ans après 3 ou 4 ans de musique par Magne et al. (2006). Ainsi, alors que la majorité des études publiées ont comparé des adultes musiciens et non musiciens, les études récentes se sont concentrées sur les premiers mois ou années d'apprentissage de la musique chez

l'enfant, démontrant l'installation précoce de ces différences fonctionnelles. Fujioka et al (2006) ont démontré en outre une amélioration de l'empan de chiffres et Moreno et al. (2008) ont rapporté une amélioration des aptitudes de lecture de mots complexes et une sensibilité accrue aux changements de hauteur dans la parole, montrant par là-même un effet de transfert entre habiletés musicales et non musicales.

En résumé, un entraînement intensif utilisant à la fois l'apprentissage d'un instrument et des exercices de discrimination auditive a probablement pour conséquence de modeler des structures corticales et sous-corticales correspondant à ces fonctions, généralement, s'agissant de structures corticales, dans le sens d'un accroissement de leur surface. Notons cependant que de telles réorganisations fonctionnelles peuvent relever de différentes modalités : un élargissement d'aires corticales suggérerait le recrutement d'un plus grand nombre de neurones corticaux; la réduction, au contraire, à la suite de l'entraînement suggérerait une automatisation de la fonction, éventuellement relayée par des structures sous-corticales; enfin, un déplacement post-entraînement pourrait refléter l'utilisation de nouveaux processus neuraux, ou la mise en place de nouvelles représentations. Dans ce contexte, une découverte intéressante est celle de Rosenkranz et al. (2007), qui ont démontré que la stimulation motrice trans-crânienne (TMS) augmente la plasticité cérébrale dans les aires motrices de musiciens comparées à des non-musiciens.

Finalement, au-delà de son effet sur la plasticité d'aires cérébrales spécifiques, l'entraînement musical, en particulier s'il est débuté tôt dans la vie de l'individu, peut augmenter la plasticité générale du cerveau et ainsi se généraliser à d'autres domaines d'apprentissage.

III/ QUELQUES APPLICATIONS AU DOMAINE DE LA REMÉDIATION DES ENFANTS EN DIFFICULTÉ D'APPRENTISSAGE.

La démonstration ainsi apportée d'une généralisation de l'effet d'un entraînement musical à d'autres fonctions peut servir de base à une

utilisation plus large et plus rationnelle de l'entraînement musical dans des buts thérapeutiques spécifiques. Des études comportementales ont ainsi apporté des preuves plus ou moins tangibles d'un effet de transfert positif entre la musique et les habiletés temporo-spatiales (Hetland 2000), les mathématiques (Costa-Giomi, 2004), la lecture (Bultzlaff, 2000), la prosodie de la parole (Thompson et al 2004), la mémoire verbale (Chan et al, 1998; Ho et al, 2003) et l'intelligence générale (Schellenberg, 2004). Pour autant, l'absence de contrôle de nombreux facteurs (différence de taille entre les groupes, motivation, stimulation cognitive...) limitent souvent la portée de ces observations. Dans une étude souvent citée, Chan et al. (1998) ont analysé 60 étudiantes de l'Université Chinoise de Hong-Kong, dont 30 avaient eu au moins six ans d'entraînement à un instrument de musique occidental avant l'âge de 12 ans et 30 n'avaient eu aucune expérience musicale particulière. Les deux groupes de participantes étaient appariés en âge (moyenne 19 ans), en niveau scolaire et en années d'éducation. Une liste de 16 mots incluant des mots de 4 catégories sémantiques étaient présentée 3 fois au sujet qui avait consigne de rappeler le plus grand nombre possible de mots. Les sujets ayant bénéficié d'un entraînement musical rappelaient en moyenne 16% de mots de plus que les sujets non entraînés musicalement. Cependant, cette constatation pourrait refléter les spécificités des langues à tons (comme le Thaï) et le lien spécifique entre l'entraînement musical et l'acquisition de la lecture reste un champ pratiquement inexploré.

Il a été auparavant démontré que l'expertise musicale améliore plusieurs aspects du traitement auditif (Peretz & Zatorre, 2005 ; Trainor et al., 2003). De plus, les résultats d'expériences d'imagerie cérébrale ont également montré que l'entraînement musical peut améliorer d'autres habiletés cognitives comme l'empan de chiffres (Fujioka et al., 2006), la lecture de mots complexes et le traitement de la hauteur, autant dans la musique que dans la parole (Moreno et al., 2008). Ces dernières constatations ont été rapprochées par leurs auteurs de la thèse de mieux en mieux documentée selon laquelle la musique et la parole partagent des processus communs (Besson et al, 2007; Patel et al., 2003). Si cela est exact, on

peut présumer qu'en améliorant certains des processus impliqués dans la perception de la musique, on peut aussi améliorer la perception de la parole et les capacités de lecture. De fait, plusieurs auteurs ont suggéré que les aptitudes précoces de perception de la parole constituent les fondations des habiletés ultérieures en lecture (Overy, 2003; Gaab et al., 2005; Swan & Goswami, 1997; Tallal & Gaab, 2006). Par exemple, Foxton et al. (2003) ont démontré de fortes corrélations chez des adultes non musiciens entre d'une part la capacité à discriminer le contour global de la hauteur de séquences sonores et d'autre part les aptitudes en phonologie et en lecture. En outre, dans une étude à large échelle conduite auprès d'enfants de 4 et 5 ans par Anvari et al. (2002), les habiletés de perception musicale ont été retrouvées prédictives des habiletés en lecture. Enfin, il est également intéressant de noter que chez des enfants avec des troubles de lecture (dyslexie) ont été retrouvés un déficit de discrimination de la hauteur dans la parole, et une anomalie du corrélât neurophysiologique du traitement de la hauteur (Santos et al., 2007). En l'occurrence, les enfants avaient à décider si le dernier mot d'une phrase était ou non prosodiquement correct par rapport au reste de la phrase, l'incongruité de hauteur étant en outre manipulée, avec des essais à faible incongruité (augmentation de 35% de la fréquence fondamentale du mot) et des essais à forte incongruité (F_0 augmentée de 120%). L'incapacité des dyslexiques à détecter les modifications de hauteur, en particulier dans la condition de forte incongruité, considérée comme très aisée par la majorité des témoins, laisse entendre que les sujets dyslexiques auraient un trouble perceptif qui se situe au-delà de la seule discrimination phonologique, probablement aussi dans l'intégration des différentes composantes de la langue orale et écrite.

Sur la base de ces considérations théoriques et ces quelques résultats encourageants, une idée intéressante serait dès lors que l'entraînement musical puisse avoir une importance particulière dans la remédiation de la dyslexie et des troubles du langage. Pour autant, à notre connaissance, seulement deux études (Standley & Huges, 1997 et Overy, 2003) ont examiné l'effet d'un entraînement musical chez des enfants

avec troubles spécifiques du langage ou de l'apprentissage de la lecture. Utilisant une série de jeux musicaux développés pour les enfants dyslexiques, spécialement centrés sur le rythme et les aptitudes de "timing", Overy (2003) a proposé à des enfants dyslexiques des activités musicales construites pour progresser graduellement depuis un niveau très basique jusqu'à un niveau plus avancé sur une période de 15 semaines. Les résultats ont montré une amélioration significative, non pas dans les aptitudes de lecture, mais dans deux domaines connexes: le traitement phonologique et les tâches de transcription écrite. De plus, la performance en transcription était corrélée significativement à la performance à une tâche de timing, suggérant un lien avec la fameuse (mais très débattue) théorie du "déficit de traitement temporel de la dyslexie" » (Tallal, 2004 ; Tallal & Gaab, 2006). D'après cette théorie, les enfants dyslexiques souffriraient d'un déficit d'un mécanisme fondamental dédié au traitement d'informations brèves et en succession rapide, et ce déficit serait à l'origine du défaut de mise en place des représentations phonologiques dont on pense généralement qu'il constitue la cause du déficit d'apprentissage caractéristique de la dyslexie. Dans une étude récente en IRMf (Gaab et al., 2005), 20 adultes musiciens et non musiciens écoutaient des séquences de 3 tons avec des intervalles inter-stimuli variables et devaient reproduire manuellement l'ordre de ces tons. Les résultats montrèrent que l'entraînement musical améliora la performance comportementale de même qu'un réseau neurofonctionnel devenu plus efficient, intéressant principalement les aires classiques du langage. Se basant sur ces résultats, Tallal & Gaab (2006) proposent que la musique contiendrait plusieurs composantes potentiellement utiles pour traiter le déficit temporo-phonologique à l'origine de la dyslexie. Le tableau I résume les différents niveaux d'arguments justifiant leur point de vue. Un autre aspect de la musique potentiellement utile pour traiter les troubles de la lecture et du langage est le fait que la musique repose fondamentalement sur un traitement intermodal, un fait qui a reçu une attention considérable dans la littérature neuroscientifique de ces dernières années. Par exemple, il a été montré que chez des trompettistes (Schulz et al., 2003), le patron d'ondes

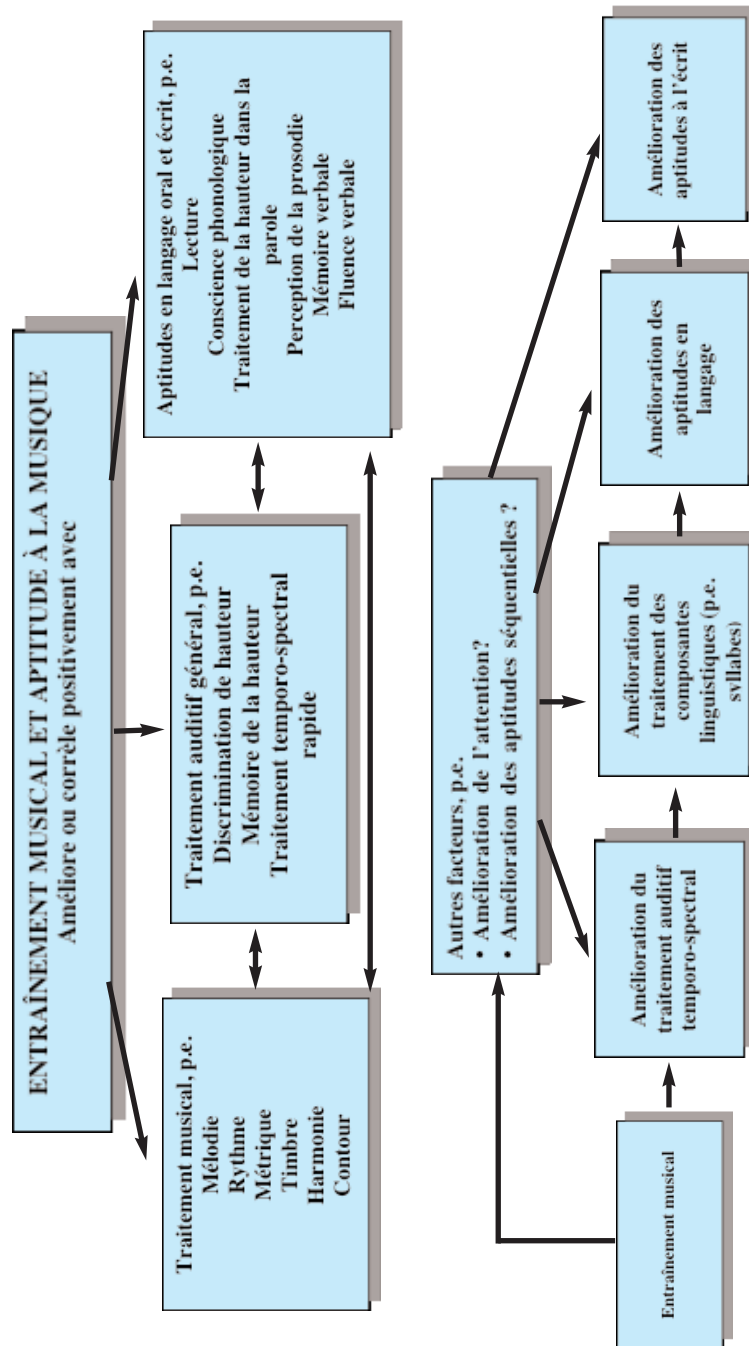


Tableau I : relations supposées entre entraînement musical, traitement auditif et aptitudes en langage oral et écrit (d'après Overy, 2003, et Tallal & Gaab, 2006).

Table I : supposed relationship between musical training, auditory processing and oral and written language skills

cérébrales enregistrées à partir de l'aire somatosensorielle de la lèvre, diffère entre une condition de stimulation combinée lèvre-tons et une condition de sommation des réponses à la stimulation des lèvres et des tons correspondants indépendamment l'une de l'autre. Ce résultat suggère que l'expérience répétée de cet instrument a permis de développer spécifiquement ces aptitudes intermodales, de façon plus prononcée que chacune des aptitudes sensorielles prise isolément. De la même manière, Lahav et al. (2003) ont montré en IRMf que des joueurs de clavier activent des régions corticales incluant l'aire de Broca quand ils écoutent des mélodies, mais seulement si ces mélodies appartenaient à leur répertoire. Pour ces auteurs, leurs résultats supportent le point de vue selon lequel l'aire de Broca joue un rôle spécifique dans "l'écoute de l'action" et que ce rôle est compatible avec celui d'un noeud central ("hub") dans le réseau des neurones miroir (Iacoboni et al., 1999). Enfin, la notion d'un réseau cérébral spécifiquement activé chez les musiciens à la fois par une activité auditive et motrice a été documentée en IRMf par Bangert et al. (2006), qui ont montré l'existence d'un vaste réseau bilatéral co-activé à la fois lors d'une tâche auditive (écouter des mélodies jouées au piano) et une tâche exclusivement orientée sur l'aspect moteur ("jouer" sur un clavier sans sortie auditive); ce réseau est activé chez des musiciens professionnels et non chez des non musiciens. La lecture musicale fournit également un terrain de choix pour comprendre les processus impliqués dans l'apprentissage musical. Par exemple, Stewart (2005) a montré qu'en entraînant durant 3 mois des adultes non musiciens à l'association entre l'emplacement des notes sur la portée et le geste moteur correspondant à 5 notes de la main on obtenait un effet d'apprentissage sous la forme d'une activation située très spécifiquement dans la région pariétale supérieure droite, suggérant un mécanisme spatial prédominant en jeu dans cet apprentissage. Par opposition, selon un même protocole mais en entraînant la correspondance entre la notation et le rythme, les auteurs montrent que l'effet de l'entraînement se traduit cette fois par une activation dans le gyrus fusiforme droit, correspondant aux régions habituellement activées par un apprentissage de lieux ou de visages, dans un locus simi-

laire à celui retrouvé dans l'hémisphère opposé lors de la lecture (aire de la forme visuelle des mots). La notion d'intermodalité apparaît également de façon claire dans les travaux de Sluming et al. (2007) qui ont étudié la population particulière des musiciens d'orchestre, particulièrement experts dans le déchiffrage de partitions, ce que les auteurs attribuent à un développement particulier d'aptitudes visuo-spatiales, où ces sujets excellent. En effet, dans une tâche de rotation mentale, l'activité en IRM fonctionnelle recrute non seulement les régions pariétales classiques, mais également l'aire de Broca, ce qui pourrait être mis en relation avec la notion de neurones miroirs citée ci-dessus. Citons enfin, dans un tout autre registre, les travaux de Schneider et al. (2007) qui ont démontré l'utilité d'un entraînement au piano pour la réhabilitation motrice de patients souffrants d'AVC.

Ces caractéristiques d'intermodalité dans le mode de fonctionnement du cerveau du musicien pourraient être particulièrement intéressantes à exploiter dans le contexte des troubles du langage et de la lecture, où des déficits de traitements intermodalitaires ont été démontrés à plusieurs reprises. Cela est particulièrement bien illustré par le processus de conversion grapho-phonémique, généralement considéré comme l'étape cruciale de l'apprentissage de la lecture, étape spécifiquement déficitaire chez l'enfant dyslexique. Par exemple, Kujala et al. (2001) ont montré que l'entraînement intensif d'enfants dyslexiques à l'aide d'un jeu de type "game-boy" nécessitant un transfert audio-visuel d'informations non linguistiques améliore de fait leurs aptitudes en lecture. De même, chez des dyslexiques francophones, Magnan et al. (2004), et Santos et al. (2007) ont utilisé le même type d'entraînement intensif intermodal, reposant sur le transfert audio-visuel d'informations pour traiter avec succès des enfants dyslexiques. Dans la dernière de ces deux études, les auteurs ont pu, à l'aide de la méthode des potentiels évoqués, démontrer des modifications significatives lors d'une tâche de discrimination de hauteur de la parole (en faisant varier la fréquence fondamentale du dernier mot d'une phrase) après entraînement intermodal (voir ci-dessus et figure 3). Ce résultat suggère donc que l'efficacité du traitement repose sur des méca-

Figure 3 : Comparaison entre des sujets dyslexiques et témoins de l'effet de congruité (forte incongruité - terminaison congrue) dans une tâche de décision sur la hauteur du dernier mot d'une phrase. Les "Ondes de différence", représentées par la surface colorée, obtenues par cette soustraction, s'amenuisent après entraînement phonologique et intermodal (flèches). D'après Santos et al., 2007

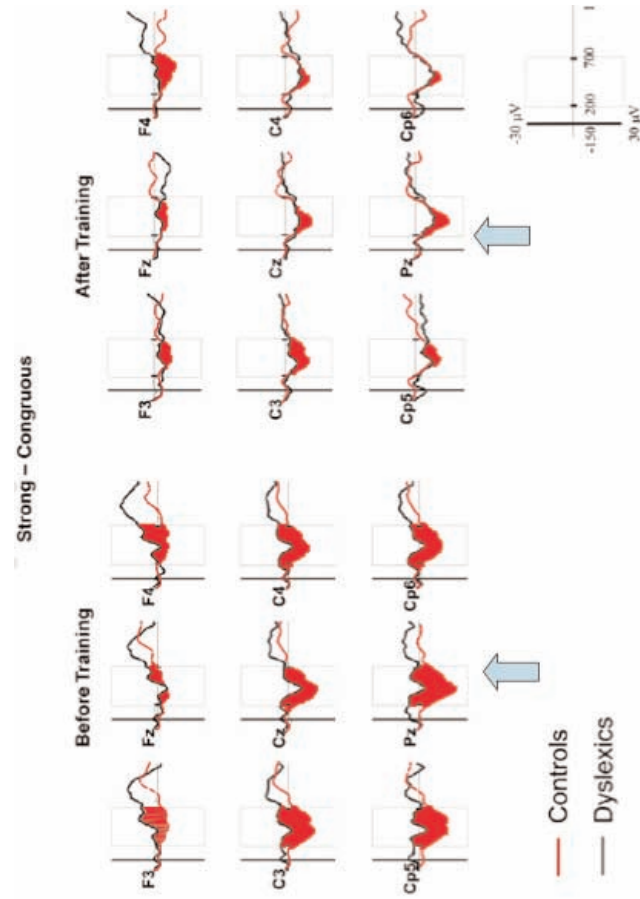


Figure 3 : comparison between dyslexics and controls for "congruity effect" obtained by subtracting trials with strong versus no prosodic incongruity on the last word of heard sentences. Difference waves (red areas), are significantly reduced after a specific phonological and cross-modal audio-visual training.

nismes communs au traitement de la phonologie et à celui de la perception prosodique, encourageant ainsi l'utilisation, dans les études futures, de l'enseignement de la musique comme moyen potentiellement thérapeutique dans la dyslexie et les troubles apparentés (tableau I). Un tel enseignement pourrait idéalement comporter différents exercices visant différentes dimensions du stimulus musical (hauteur, rythme, timbre, métrique...), mais aussi des caractéristiques communes au langage musical et à la lecture, comme la conscience du contenu sonore d'une phrase, le transcodage intermodalitaire audio-visuel, le traitement d'informations auditives brèves et en succession rapide, autant de processus connus pour être spécifiquement déficitaires chez les dyslexiques (Habib, 2008) et dont l'entraînement sélectif ou combiné a toutes chances d'être suivi d'une amélioration décisive des déficits observables.

On mesure ainsi les implications majeures tant au niveau thérapeutique que pédagogique que de telles avancées pourraient constituer, en visant comme champ d'études le domaine encore quasiment inexploré des liens entre neurosciences et pédagogie — ce que l'on appelle déjà la “neuro-pédagogie” —, domaine qui pourrait fort bien trouver là le terrain idéal de son expansion future.

ABSTRACT

Language, music, and brain plasticity : perspectives for remediation

This article summarizes the main evidence to date as to the links between brain and music, considered as both a unique human skill and a special mental activity apt to modify the proper organ from which it has arisen. Musical expertise, necessarily linked to a most often early and intensive learning, is associated with neuroanatomical distinctive features which have been demonstrated owing to the advent of modern neuroimaging techniques, especially magnetic resonance imaging (MRI). These distinctive features are present in several brain regions, all being more or

less involved either in gestural motor skill (therefore probably related to the use of an instrument) or in auditory perception. There is also growing evidence that learning music possesses more general effects on brain plasticity, as demonstrated in recent work finding increased learning abilities in musicians. One important notion, related to this topic, is that of a probable “sensitive period”, believed to stand at about 7 years of age, beyond which music-induced structural changes as well as learning effects are less pronounced. These data are discussed in the perspective of using musical training in children with specific learning disorders, especially language and reading disorders. In particular, preliminary results having shown some influence of music learning on language-based reading skills hold the promise of interesting perspectives in the domain of “neuropædogy”.

RÉFÉRENCES

- Anvari, S. H., Trainor, L. J., Woodside, J., & Levy, B. A. (2002). Relations among musical skills, phonological processing, and early reading ability in preschool children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 83, 111–30.
- Bangert, M., Altenmüller, E.O. (2003). Mapping perception to action in piano practice: a longitudinal DC-EEG study. *BMC Neurosci.*, 4:26.
- Bangert, M., Jürgens, U., Häusler, U., Altenmüller, E. (2006). Classical conditioned responses to absent tones. *BMC Neurosci.*; 7:60.
- Bangert, M., Peschel, T., Schlaug, G., Rotte, M., Drescher, D., Hinrichs, H., Heinze, H.J., and Altenmüller, E. (2006). Shared networks for auditory and motor processing in professional pianists: Evidence from fMRI conjunction. *NeuroImage* 30 : 917 – 926.
- Bangert, M., Schlaug, G. (2006). Specialization of the specialized in features of external human brain morphology *European Journal of Neuroscience*, Vol. 24, pp. 1832–1834.
- Bengtsson, S.L., Nagy, Z., Skare, S., Forsman, L., Forssberg, H. & Ullen, F. (2005) Extensive piano practicing has regionally specific effects on white matter development. *Nat. Neurosci.*, 8, 1148–1150.

- Bermudez P, Zatorre RJ. (2005). Differences in gray matter between musicians and non-musicians. *Ann N Y Acad Sci.* 1060:395-9.
- Bultzlaff, R. (2000). Can music be used to teach reading? *Jal. of Aesthetic Education*, 34, 167- 178
- Chan, A.S, Ho, Y.C, & Cheung, M.C. (1998) Music training improves verbal memory. *Nature*, 396, 128.
- Costa-Giomi, E. (2004) Effects of three years of piano instruction on children's academic achievement, school performance and self- esteem. *Psychology of music*, 32, 139-52.
- Edeline JM. Learning-induced physiological plasticity in the thalamo-cortical sensory systems: a critical evaluation of receptive field plasticity, map changes and their potential mechanisms. *Prog Neurobiol* 1999; 57: 165–224.
- Elbert, T., Pantev, C., Wienbruch, C., Rockstroh, B., Taub, E. (1995). Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players, *Science*, 270 : 305-307.
- Engineer ND, Percaccio CR, Pandya PK, Moucha R, Rathbun DL, Kilgard MP. Environmental enrichment improves response strength, threshold, selectivity, and latency of auditory cortex neurons. *J Neurophysiol* 2004; 92: 73–82.
- Foxton, J.M., Talcott, J.B., Witton, C., Brace, H., McIntyre, F., Griffiths, T.D. (2003). Reading skills are related to global, but not local, acoustic pattern perception.. *Brief Communication Nature Neuroscience*, 6, 343-344
- Fujioka, T., Ross, B., Kakigi, R., Pantev, C., Trainor, L. (2006). One year of musical training affects development of auditory cortical-evoked fields in young children.. *Brain*, 129, 2593-2608.
- Gaab, N, Tallal, P., Kim, H., Lakshminarayanan, K., Archie, J., Glover, G., Gabrieli, J. (2005) Neural correlates of rapid spectro-temporal processing in musicians and nonmusicians. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1060, 82–88
- Gaser, C. , Schlaug. G. (2003). Brain structures differ between musicians and nonmusicians. *J. Neurosci.* 23: 9240–9245.
- Habib, M. (2008). Corrélat linguistiques, cognitifs et neurologiques de la dyslexie : aspects théoriques et applications rééducatives. In: R. Jouvent & G. Chapouthier, Eds. "La cognition réparée? Perturbations et récupérations des fonctions cognitives". Paris, Editions de la Maison des sciences de l'homme.
- Hetzland, L. (2000) Learning to make music enhances spatial reasoning. *J. of Aesthetic Educ*, 34, 179–238.

- Ho, Y.C., Cheung, M.C., & Chan, A.S. (2003) Music training improves verbal but not visual memory: cross-sectional and longitudinal explorations in children. *Neuropsychology*, 17 (3), 439-50.
- Iacoboni M, Woods RP, Brass M, Bekkering H, Mazziotta JC, Rizzolatti G . (1999) . Cortical mechanisms of human imitation. *Science* 286:2526 –2528.
- Jenkins W.M., Merzenich M.M., Recanzone G. (1990). Neocortical representational dynamics in adult primates: implications for neuropsychology. *Neuropsychologia*, 28 : 573-584.
- Keenan JP, Thangaraj V, Halpern AR, Schlaug G. (2001). Absolute pitch and planum temporale. *Neuroimage*. 14(6):1402-8.
- Kujala T, Karma K, Ceponiene R, Belitz S, Turkkila P, Tervaniemi M, Naatanen R. (2001). Plastic neural changes and reading improvement caused by audiovisual training in reading-impaired children. *Proc Natl Acad Sci USA*, 98:10509–14.
- Lahav, A., Saltzman, E. Schlaug, G. (2007). Behavioral/systems/cognitive action representation of sound: audiomotor recognition network while listening to newly acquired actions. *The Journal of Neuroscience*, 27(2):308 –314.
- Lee D.J., Chen Y., Schlaug G. (2003). Corpus callosum: musician and gender effects. *NeuroReport* 14:205-209.
- Magnan A, Ecalle J, Veuillet E, Collet L. (2004). The effects of an audio-visual training program in dyslexic children. *Dyslexia* 10:131-140.
- Moreno, S., Marques, C., Santos, A., Santos, M., Castro, S.L. & Besson, .M. (2008). Musical training influences linguistic abilities in 8-year-old children: more evidence for brain plasticity. *Cerebral Cortex*, Advanced Access Published October 1st, 2008.
- Overy, K. (2003) Dyslexia and music. From timing deficits to musical intervention. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 999, 497–505
- Pantev C, Oostenveld R, Engelien A, Ross B, Roberts LE and Hoke M. Increased auditory cortical representation in musicians. *Nature* 1998; 392:811–814.
- Pantev C, Roberts LE, Schulz M, Engelien A, Ross B. (2001). Timbre-specific enhancement of auditory cortical representations in musicians. *Neuroreport*, 12: 169–74.
- Pascual-Leone, A., Nguyen, D., Cohen, L.G., Brasil-Neto, J.P., Cammarota, A., Hallett, M. Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. *J Neurophysiol.* 74(3):1037-45.

- Peretz, I. and Zatorre, R. (2005) Brain organization for music processing. *Annu. Rev. Psychol.* 56, 89–114.
- Recanzone GH, Schreiner CE, Merzenich MM. (1993). Plasticity in the frequency representation of primary auditory cortex following discrimination training in adult owl monkeys. *J Neuroscience*, 13: 87–103.
- Santos A., Joly-Pottuz B., Moreno S., Habib M., Besson M. (2007). Behavioural and event-related potentials evidence for pitch discrimination deficits in dyslexic children : Improvement after intensive phonic intervention. *Neuropsychologia*, 45 :1080-1090.
- Schlaug G., Jäncke L., Huang Y., et al. (1995a). Increased corpus callosum size in musicians. *Neuropsychologia* 33: 1047-1054.
- Schlaug G., Jäncke L., Huang Y., et al. (1995b). In vivo evidence of structural brain asymmetry in musicians. *Science* 267: 699-701.
- Schmithorst V.J., Wilke M. (2002). Differences in white matter architecture between musicians and non-musicians: a diffusion tensor imaging study *Neuroscience Letters* 321 (2002) 57–60
- Schneider, P., Scherg, M., Dosch, H.G., Specht, H.J., Gutschalk, A., Rupp, A. (2002). Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians. *Nat. Neurosci.*, 5(7):688-94.
- Schneider, S., Schönle, P.W., Altenmüller, E., Münte, T.F. (2007). Using musical instruments to improve motor skill recovery following a stroke. *J Neurol.*; 254(10):1339-46.
- Schulz, M., Ross B., Pantev C. (2003). Evidence for training-induced crossmodal reorganization of cortical functions in trumpet players. *Neuroreport*, 14(20) : 157-161.
- Shahin A, Roberts LE, Pantev C, Trainor LJ, Ross B. (2005). Modulation of P2 auditory-evoked responses by the spectral complexity of musical sounds. *Neuroreport* 16: 1781–5.
- Sluming, V., Brooks, J., Howard, M., Downes, J.J., Roberts, N. (2007). Broca's area supports enhanced visuospatial cognition in orchestral musicians. *J Neurosci.* 27 (14):3799-806.
- Standley, J.M. and Huges, J.E. (1997) Evaluation of an early intervention music curriculum for enhancing prereading/writing skills. *Music Ther. Perspect.* 15, 79–85

- Stewart, L. (2005). A neurocognitive approach to music reading. *Ann N Y Acad Sci.*, 1060:377-386.
- Swan, D., & Goswami, U. (1997). Phonological awareness deficits in developmental dyslexia and phonological representations hypothesis. *Journal of Experimental Child Psychology*, 66, 18-41.
- Tallal P. (2004). Improving language and literacy is a matter of time. *NATURE REVIEWS NEUROSCIENCE* 5 : 721-728.
- Tallal P., Gaab N. (2006). Dynamic auditory processing, musical experience and language development. *TRENDS in Neurosciences* 29 (7) : 382-390.
- Thompson, W.F., Schellenberg, E.G. & Husain, G. (2004) Decoding speech prosody: Do music lessons help? *Emotion*, 4, 46-64.
- Trainor, L.J. et al. (2003) Effects of musical training on the auditory cortex in children. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 999, 506–513
- Watanabe, D, Savion-Lemieux, T, Penhune, V.B. (2007). The effect of early musical training on adult motor performance: evidence for a sensitive period in motor learning. *Exp Brain Res*, 176:332–40.
- Weinberger NM. (2004). Specific long-term memory traces in primary auditory cortex. *Nat Rev Neurosci* 5: 279–90.
- Witelson SF, Kigar DL. (1992). Sylvian fissure morphology and asymmetry in men and women: bilateral differences in relation to handedness in men. *J Comp Neurol.*, 323: 326–40. 1991; 17: 583–91.
- Zatorre, R. J., Evans, A. C., Meyer, E., and Gjedde, A. (1992). Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science* 256: 846 – 849.
- Zatorre R.J., Belin P., Penhume V.B. (2002). Structure and function of auditory cortex : music and speech. *Trends Cogn. Sci.*, 6 : 37-46.
- Zatorre RJ. (2003). Absolute pitch: a model for understanding the influence of genes and development on neural and cognitive function. *Nat Neuroscience*, 6:692–695.