



**HAL**  
open science

## Neurosciences de la musique

Clément François, Daniele Schön

► **To cite this version:**

Clément François, Daniele Schön. Neurosciences de la musique. Eric Tardif et Pierre-André Doudin. Neurosciences et cognition, Perspectives pour les sciences de l'éducation, De Boeck supérieur, 2016, 9782807301801. hal-03104939

**HAL Id: hal-03104939**

**<https://hal.science/hal-03104939v1>**

Submitted on 10 Jan 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Neurosciences de la Musique

Clément François<sup>1,2</sup> & Daniele Schön<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>: Psicologia Bàsica, Universitat de Barcelona, APAL Group

<sup>2</sup>: ICREA, University of Barcelona, IDIBELL. Cognition and Brain Plasticity Group,

<sup>3</sup>: Aix Marseille Université, Institut de Neurosciences des Systèmes, Marseille, France

<sup>4</sup>: INSERM, U 1106, Marseille, France.

Depuis déjà de nombreuses années, les progrès de la recherche dans le domaine des neurosciences, de la psychologie et des sciences cognitives ont permis de mieux appréhender le fonctionnement du cerveau. Ces progrès considérables permettent aujourd'hui et permettront demain une meilleure détection et prise en charge ainsi qu'un meilleur traitement de sérieux problèmes de santé publique tels que les troubles neurodéveloppementaux résultant souvent en de difficiles troubles de l'apprentissage. Récemment, tout un pan de recherche s'est développé et vise à utiliser la musique comme outil pour étudier la plasticité cérébrale, notamment afin de développer certaines compétences qui sont cruciales pour un développement linguistique et cognitif optimal. Grâce à ses propriétés multisensorielles, hédoniques, structurelles et sociales, la pratique de la musique a certainement un rôle important à jouer dans le développement et la progression des sciences de l'éducation. Nous reportons dans ce chapitre les bases développementales de la perception du langage et de la musique chez le bébé, qui plus tard est susceptible de devenir musicien et de voir ainsi son cerveau modifié par la pratique de la musique. Grâce à une forte demande de la musique exercée sur l'ensemble du réseau audio-moteur, le musicien présente ainsi des particularités anatomo-fonctionnelles qui lui confèrent une sensibilité accrue pour différents paramètres du signal de parole l'avantageant ainsi dans différents apprentissages. La plasticité induite par la pratique musicale est l'objet de la seconde

partie. Nous concluons ce chapitre en reportant un exemple d'application d'utilisation de la pratique musicale en vue de pallier certains problèmes rencontrés dans la dyslexie et décrivons les études s'intéressant au lien entre musique et intelligence.

## **1. Langage et musique: des compétences perceptives qui se développent très tôt.**

### **Avant la naissance**

Déjà quelques mois avant la naissance, alors que le système visuel n'est pas encore mature, le système auditif humain est quant à lui tout à fait fonctionnel (Chelli & Chanoufi, 2008). Le futur nourrisson perçoit bien les sons de l'environnement, principalement les sons de basses fréquences portant la mélodie du langage, la prosodie. Le fœtus se développe au rythme des battements cardiaques de la mère agissant tel un métronome et constituant sa première expérience avec le rythme. Dès le 3<sup>ème</sup> mois de grossesse, il apprend à connaître, reconnaître la voix de sa mère et arrive même à mémoriser les berceuses qu'elle lui chante (Sansavini, Bertoncini, & Giovanelli, 1997; Kisilevsky et al. 2003; Kisilevsky et al., 2009; Granier-Deferre, Ribeiro, Jacquet, & Bassereau, 2011). L'activité magnétique cérébrale (reflétant l'activité synchronisée de milliers de neurones corticaux) peut d'ores et déjà être mesurée avant la naissance grâce à la Magnéto-Encéphalographie foetale. Ainsi, le fœtus de 3 mois détecte des changements de fréquence (Draganova et al., 2005; Huotilainen et al., 2005) et manifeste déjà la réponse corticale dite de négativité de discordance ou MMN (pour Mismatch Negativity) bien connue chez l'adulte et le nouveau-né et qui indique la présence d'une trace mnésique, générée d'une manière automatique, de régularités physiques ou abstraites. Une fois né et propulsé dans un nouvel environnement très bruyant, dans lequel l'oreille change de mode de fonctionnement, passant d'une conduction liquidienne à une conduction aérienne, le nouveau-né est ainsi déjà doté de grandes compétences dans le domaine auditif, lesquelles sont désormais plus facilement observables, accessibles et quantifiables. Il est du coup possible de constater qu'au cours de la première année de vie, le bébé va connaître un raffinement progressif de sa sensibilité auditive, tant pour les sons linguistiques que pour les sons musicaux avec une spécialisation de la perception pour les contrastes auxquels le bébé est exposé, et une réduction de la sensibilité aux contrastes moins familiers.

### **Pendant la première année de vie**

Durant les 6 premiers mois de sa vie, le bébé est souvent considéré comme un citoyen du monde. En effet, du point de vue musical il est sensible à différents styles musicaux tout en étant, du point de vue linguistique, sensible aux sons de toutes les langues. Il arrive ainsi à percevoir des modifications de hauteur dans des mélodies issues du système musical dans lequel il est immergé mais également issues d'un système musical différent (par ex. musique javanaise, Lynch, Eilers, Oller, & Urbano, 1990). Il se produit sensiblement le même phénomène vis-à-vis de la perception du rythme: avant 6 mois, le bébé arrive à détecter des changements dans des structures rythmiques complexes qui ne sont que très peu présentes dans le système musical dans lequel il est immergé (Hannon & Trehub, 2005). Sous l'influence de son environnement culturel, il va progressivement perdre la sensibilité pour ces différents paramètres jusqu'à ce que son oreille "s'accorde" à la musique de son environnement. Ainsi, à 12 mois le bébé se comporte comme un adulte et ne détecte plus les fausses notes dans des mélodies issues d'un système musical étranger (Lynch & Eilers, 1992). Du point de vue linguistique, avant ses 6 mois, le bébé est sensible aux contrastes phonétiques de toutes les langues alors que l'adulte, sauf dans le cas du bilinguisme, a perdu cette sensibilité et ne perçoit plus que les phonèmes de sa langue maternelle (Cheour et al., 1998; Kuhl, 2004). La perception catégorielle des phonèmes a été étudiée chez des bébés japonais et américains à 6-8 mois et 10-12 mois. Alors qu'à 6-8 mois les bébés japonais et américains catégorisent de la même manière le contraste phonétique "ra"/"la", à 10-12 mois les bébés japonais ne catégorisent plus ces deux contrastes comme étant différents alors que les bébés américains font la différence. Les petits japonais ont donc perdu la sensibilité à ce contraste phonologique entre 6-8 et 10-12 mois, contraste phonologique qui n'est pas signifiant en japonais alors qu'il l'est en anglais. Ainsi, jusqu'aux alentours de 10 mois, le bébé différencie les consonnes de différentes langues mais il a déjà perdu cette sensibilité pour les voyelles entre 6 et 8 mois (Polka & Werker, 1994; Werker & Tees, 1984). Aux alentours de 9 mois, le bébé reconnaît les patrons rythmiques de sa langue maternelle alors qu'il ne reconnaît plus ceux de différentes langues étrangères (Jusczyk, 2000). Il apparaît ainsi intéressant de constater que la sensibilité pour les différents paramètres de la musique et du langage suivent un développement relativement comparable chez le tout petit et que la diminution de cette sensibilité ne se fait quasiment que grâce à

l'immersion dans un monde aux propriétés culturelles linguistiques et musicales bien spécifiques modelant et accordant le cerveau du bébé à son environnement.

## **2. L'acquisition du langage et de la musique: extraire les mots de la parole et leur attribuer du sens: les problèmes de segmentation et d'association mot-image chez le bébé.**

Déjà avant le babillage, période pendant laquelle il produit inlassablement les mêmes phonèmes de manière répétée, le tout petit reconnaît vite certains mots familiers et arrive à segmenter un flot continu de paroles. Cette capacité à segmenter et extraire les mots du signal continu de paroles est considérée comme une étape fondamentale dans l'acquisition du langage, elle est un prérequis obligatoire pour un développement linguistique de bonne qualité. En effet, des études ont montré un lien fort entre cette capacité de segmentation et les compétences linguistiques (mesurées par la taille du lexique productif et perceptif) à l'âge de 24 mois (Newman, Ratner, Jusczyk, Jusczyk, & Dow, 2006 ; Singh Reznick, & Xuehua, 2012). De plus, cette compétence est souvent déficitaire chez les grands prématurés (Bosch, 2012) qui présentent généralement plus tard un développement linguistique altéré entre 30 et 40 mois (Sansavini et al., 2010). Il est d'ailleurs assez facile de mesurer la difficulté de cette étape lorsqu'on écoute pour la première fois de sa vie une langue étrangère très éloignée de la sienne. Pourtant, là encore, cette capacité se développe de manière automatique et serait notamment dépendante des propriétés structurelles des séquences de phonèmes. En se basant sur l'observation que l'organisation structurelle des phonèmes est une dimension importante du signal de parole (Hayes & Clark, 1970), Saffran, Aslin, et Newport (1996) ont étudié la capacité de segmentation chez le bébé de 6 mois dans une configuration de laboratoire à l'aide d'un langage artificiel miniature régi par des règles statistiques. L'idée est que les deux syllabes "jo" et "li" par exemple, soient entendues l'une après l'autre fréquemment, d'ailleurs "joli" est un vrai mot français qui sera entendu suivi de mots qui la plupart du temps sont tous différents. Ainsi, de manière générale, les syllabes qui se trouvent à l'intérieur des mots, et donc qui forment les vrais mots du langage, apparaissent plus souvent ensembles (et donc présentent une forte probabilité d'occurrence) que les syllabes se trouvant aux frontières des mots, à cheval entre deux mots (qui présentent elles une faible probabilité d'occurrence). Ainsi, des bébés de 6 mois arrivent à reconnaître et

donc à segmenter les mots du langage après seulement 2 minutes d'écoute de ce flux continu de syllabes synthétiques sur la seule base des propriétés statistiques. De manière intéressante, les bébés présentent une sensibilité similaire pour des séquences de sons musicaux suggérant que ce type d'apprentissage est commun à l'acquisition du langage et de la musique (Saffran, Johnson, Aslin, & Newport, 1999).

Pour autant, hormis ces indices statistiques, de nombreux indices acoustiques sont présents dans le signal de parole naturelle et permettent tout de même de faciliter la bonne extraction des mots d'une phrase. Ces indices acoustiques tels que les changements de contour prosodiques par exemple, vont former la mélodie du langage et donc permettre de différencier une phrase affirmative d'une phrase interrogative. En effet, les phrases interrogatives sont caractérisées par une augmentation de la hauteur en fin de phrase alors que les phrases affirmatives sont plutôt caractérisées par une diminution de la hauteur (Lieberman & Pierrehumbert, 1984). Ces variations prosodiques sont importantes pour l'acquisition du langage chez les bébés et là aussi, les grands prématurés semblent présenter un déficit du traitement de l'information prosodique pendant les 6 premiers mois de vie (Herold, Höhle, Walch, Weber, & Obladen, 2008). Lorsque l'on parle à un nouveau né, même pour la première fois et même si ce n'est pas le sien, on parle avec une intonation particulière en utilisant une prosodie exagérée appelée Infant Directed Speech (IDS, ou motherese ou parler bébé). En comparaison avec le discours dirigé vers l'adulte (Adult Directed Speech, ADS), l'IDS se caractérise par un débit de parole plus faible, de plus grandes variations de hauteur et de contour, des pauses plus grandes, des structures de phrases plus simples (Fernald, 1992). Ainsi, les nouveaux nés segmentent mieux un discours prononcé avec une prosodie de type IDS qu'un discours prononcé avec une prosodie de type ADS (Thiessen, Hill, & Saffran, 2005). Dans la même veine, l'IDS facilite la segmentation des derniers mots dans une phrase (Aslin, 2000). Dans la mesure où l'enfant ne comprend pas encore les mots du langage, l'exagération des variations prosodiques aurait une fonction émotionnelle, attentionnelle et linguistique dont les régularités de contour prosodique seraient utilisées pour segmenter le flux de paroles (Trainor, Austin, & Desjardins, 2000). De manière intéressante, ces auteurs ont également montré que les nouveaux-nés préféreraient le chant de leur mère plutôt que le discours parlé de leur mère (Trainor, 1996).

Le bénéfice apporté par la dimension mélodique contenu dans un signal de parole chantée sur la capacité de segmentation a ainsi été démontré récemment. Dans cette

étude, Schön et al. (2008) ont utilisé une procédure similaire à celle décrite précédemment chez le bébé et ont testé 3 groupes de jeunes adultes avec trois langages différents. L'un était parlé, l'autre était chanté, synchronisé (i.e., les structures statistiques syllabiques et mélodiques étaient totalement superposées et en phase), et le dernier était chanté, désynchronisé (i.e., les structures statistiques syllabiques et mélodiques étaient décalées et donc plus en phase). Alors que le groupe exposé au langage parlé répondait au hasard dans le test, le groupe exposé au langage chanté présentait des performances supérieures au hasard et le troisième groupe des performances intermédiaires. Ces résultats montrent là encore l'apport bénéfique de la dimension structurelle de la musique sur une des premières étapes fondamentales de l'acquisition du langage. Ce bénéfice est également suggéré pour une étape ultérieure de l'acquisition du langage: l'étape d'association du mot à l'image (word to world mapping). Une fois les mots segmentés, le tout petit va devoir associer par exemple la forme auditive "maison" à l'objet ou au concept qu'elle représente pour nous. Shukla, White et Aslin (2011) ont montré que des bébés de 6 mois arrivaient à segmenter des nouveaux mots bisyllabiques prononcés dans une courte phrase tout en l'associant à une image lorsque ce mot coïncide avec la frontière prosodique contenu dans la phrase alors qu'ils n'arrivent pas à associer l'image aux mots tombant au milieu d'une frontière prosodique<sup>1</sup>. Ce dernier résultat est important pour plusieurs raisons, d'une part ils montrent que les bébés reconnaissent et associent des formes auditives plus facilement grâce à l'information prosodique, d'autre part, ils montrent que cette capacité déjà révélée chez l'adulte est déjà présente chez le bébé.

Ainsi, l'ensemble de ces résultats montre que durant leur première année de vie, les bébés présentent une facilité d'apprentissage du langage et de la musique. Les sensibilités aux différents paramètres du langage et de la musique sont étroitement liées et présentent des trajectoires développementales comparables. Les propriétés motivationnelles, émotionnelles et structurelles de la musique et du chant semblent être ainsi de bonnes cibles afin d'optimiser les trajectoires développementales chez l'enfant.

---

<sup>1</sup> Les frontières prosodiques correspondent aux variations de rythme, de durée, de fréquence fondamentale et de débit du signal de parole permettant de grouper ensemble plusieurs mots ou phrases. En français par exemple, l'indice principal marquant la fin d'une unité prosodique est l'allongement de la dernière syllabe du mot d'un groupe.

### **3. Pratique musicale et plasticité cérébrale**

Durant toute la vie, les interactions avec l'environnement modifient les connexions entre neurones existants via la synaptogenèse. Lorsqu'une interaction se répète assez souvent, les nouvelles synapses se renforcent et se stabilisent, ce qui permet de consolider les nouveaux acquis. Si l'interaction n'a plus lieu, les nouvelles synapses se dégradent, et on oublie. Ces mécanismes de plasticité sur lesquels nous allons revenir sont aussi à l'œuvre dans la pratique musicale.

Il existe plusieurs façons d'étudier la plasticité cérébrale. On peut suivre le développement de l'enfant, en même temps que les changements cérébraux liés à l'âge et à l'expérience, la pratique musicale, qui nous intéresse ici. Une deuxième méthode consiste à comparer le fonctionnement du cerveau entre deux groupes, un dit expert, c'est-à-dire des musiciens, et un groupe de contrôle (des non-musiciens).

#### **Qu'est-ce qu'un musicien ?**

On pourrait dire que nous sommes tous musiciens car nous pouvons tous reconnaître et apprécier une musique (sauf quelques rares cas d'amusie congénitale, cf. plus bas). Cependant nous allons choisir une définition plus opérationnelle de ce que signifie être musicien, qui implique la pratique d'un instrument (y compris la voix bien sûr), car notre position vis-à-vis de la plasticité nous amène à privilégier une vision active de la musique par rapport à une vision d'écoute passive. Nous reviendrons là-dessus. Pour l'instant contentons nous de constater que la quantité d'heures passées par un musicien à jouer d'un instrument est souvent supérieure à 10 000 heures par an. Le musicien commence souvent très jeune – entre cinq et dix ans –, ce qui fait qu'un jeune adulte musicien d'orchestre et âgé de 20 ans peut avoir déjà 10 000 heures de pratique instrumentale à son actif. Pendant toutes ces heures de pratique, le musicien développe des compétences motrices (rapidité, précision), de coordination motrice (e.g., synchronisation et indépendance manuelle) et visuo-motrices (lecture de la partition), des compétences dans le domaine auditif (e.g., justesse, qualité timbrale du son), mais aussi des compétences plus générales telles que la mémoire, l'orientation de l'attention dans le temps et dans l'espace, la synchronisation avec l'autre, et bien d'autres que nous verrons plus tard. Ces compétences reposent sur des modifications

des substrats neuronaux sous-jacents, c'est-à-dire à l'intérieur des aires cérébrales impliquées. Les neurosciences de la musique se sont beaucoup intéressées à démontrer quels sont les circuits cérébraux qui permettent ces changements.

### **Des sorties et des entrées**

A l'origine de notre société, la musique était (et reste en partie) très fortement reliée à la danse, au théâtre (e.g., en Grèce), aux cérémonies et à la société en général. Dans ce contexte, la musique n'est pas une simple série de notes qui sortent d'un casque audio ou d'un autoradio, mais elle est tout d'abord, mouvement organisé. Ce mouvement, produit par les musiciens, nécessite souvent une grande précision (au mm près sur un violon) et une grande rapidité (un pianiste professionnel peut jouer plus de 1000 notes par minute).

Il n'est donc pas surprenant qu'historiquement, les neurosciences se soient d'abord intéressées à la plasticité induite par la pratique musicale au niveau du système moteur. On sait désormais que, dans le cortex moteur, l'aire correspondant aux mouvements de la main est plus développée chez les pianistes que chez des sujets contrôles. Qui plus est, alors que chez les pianistes les deux mains nécessitent un contrôle moteur fin des doigts, chez les violonistes l'utilisation des deux mains est asymétrique: les doigts de la main gauche doivent réaliser des mouvements très rapides et précis, tandis que ceux de la main droite, qui tiennent l'archet, sont bien moins indépendants. Schlaug, Jäncke, Huang et Steinmetz (1995) ont comparé l'anatomie du cortex moteur de pianistes, de violonistes et de non-musiciens. Ils ont constaté un plus grand volume cortical dans les zones qui commandent le mouvement des doigts et de la main chez les musiciens par rapport aux sujets contrôles. Cette augmentation de volume se réalisant dans un volume fixe, celui du crâne, le cortex se replie sur lui-même, se traduisant par un renforcement des plis du sillon central et des gyri pré- et post-centraux. En effet, alors que l'aire de la main peut parfois évoquer la lettre grecque oméga, l'imagerie structurale (IRM) révèle que ce signe oméga est plus développé chez les musiciens que chez les non-musiciens. Cette augmentation est visible dans les cortex moteur gauche et droit chez les pianistes, alors qu'elle n'est visible que dans le cortex moteur droit (qui contrôle la main gauche) chez les violonistes. Ainsi, l'ampleur du signe oméga peut être interprétée comme une mesure

indirecte du volume de l'aire de la main; la marque va d'un oméga à peine visible à un oméga bien visible, voire à un double oméga (qui devient presque un epsilon).

Ces modifications au sein du cortex moteur existent aussi au sein du cortex somatosensoriel, celui qui, par exemple, nous permet, quand nous avons les yeux fermés, de reconnaître la forme et la texture d'un objet. Celui là même qui permet aux musiciens d'avoir un retour sensoriel sur le déplacement de la main, sur la qualité du touché chez le pianiste et du vibrato chez le violoniste. On peut ainsi étudier l'activation du cortex somatosensoriel en stimulant les doigts les uns après les autres avec des trains de vibrations. La réponse cérébrale déclenchée par de telles stimulations est plus importante chez les musiciens que chez les non-musiciens et plus ample à droite (correspondant à la main gauche, rappelons-le) pour les violonistes. Cela indique une sensibilité tactile accrue chez les musiciens (Elbert, Pantev, Wienbruch, Rockstroh, & Taub, 1995).

Si le contrôle moteur est d'une importance extrême pour les musiciens professionnels, la coordination des processus sensoriels et moteurs des doigts et des mains est également primordiale. La coordination des mains nécessite une transmission d'informations massive d'un hémisphère à l'autre, puisque chaque main est contrôlée par l'hémisphère opposé. Différentes études ont mis en évidence que le volume des fibres axonales ("matière blanche") qui connectent les deux hémisphères chez les musiciens est supérieur à celui observé chez les non-musiciens au niveau du corps calleux (dans sa partie antérieure).

Cette modification de structure a des conséquences sur le plan fonctionnel: d'avantage de fibres connectant les deux hémisphères permettent une transmission plus rapide de l'information entre les deux cortex moteurs, ceci est indispensable pour bien coordonner les mouvements des deux mains. Ce renforcement des connexions interhémisphériques s'accompagne d'une réduction de l'inhibition interhémisphérique des aires motrices des mains (Ridding, Brouwer, & Nordstrom, 2000). En effet, souvent lorsque l'on accomplit un geste (on écrit, on épluche une pomme de terre, etc...), on privilégie l'une des deux mains, l'autre étant inhibée. Au contraire, chez les instrumentistes, les deux mains sont nécessaires, et l'inhibition qu'exerce normalement une main sur l'autre est levée. Ceci refléterait l'indépendance du contrôle des mains acquis par les instrumentistes.

Alors que certains lecteurs auront été surpris par notre définition de musique en tant que mouvement organisé, une définition en tant que son organisé semblera moins

surprenante, car de nos jours il arrive souvent d'écouter simplement de la musique, hors contexte social à proprement parler. Mais il est vrai aussi que ces sons organisés peuvent nous évoquer de fortes émotions, rien qu'à l'écoute. Là encore, le musicien présente une écoute particulièrement développée grâce à toutes ces années passées à chercher d'abord la justesse, ensuite la couleur (timbre) appropriée à un contexte musical, le vibrato, le phrasé, l'équilibre des voix dans un quatuor à cordes ou dans un groupe de pop.

Le résultat est visible sur presque toute la voie auditive qui va de la cochlée au cortex auditif. En effet, déjà au niveau du faisceau olivocochleaire efférent médian<sup>2</sup> qui contrôle la micromécanique cochléaire, des différences sont visibles entre musiciens et non-musiciens, avec les premiers ayant un contrôle plus important du complexe olivaire sur la cochlée, leur permettant une meilleure protection vis-à-vis des traumatismes acoustiques, une meilleure perception dans le bruit et une attention sélective accrue (Perrot & Collet, 2014).

Si l'on remonte le long des voies auditives en direction du cortex, on trouve une petite structure nommée colliculus inférieur. Depuis une dizaine d'année, le groupe de Nina Kraus a publié un nombre important de recherches qui montrent que l'activité de cette structure serait fortement modifiée par la pratique musicale. Puisque l'activité du colliculus reflète d'assez près les caractéristiques acoustiques du stimulus auditif, il est possible de mesurer le degré de ressemblance (corrélation) entre ces deux signaux. Il s'avère qu'une telle corrélation est plus importante pour les musiciens que les non-musiciens, ce qui montrerait une plus grande fidélité et précision de la réponse du colliculus induite par la pratique musicale, et cela indépendamment du fait que le stimulus soit un stimulus musical ou langagier (Musacchia, Sams, Skoe, & Kraus, 2007). De façon surprenante, lorsque l'on présente le stimulus en présence d'un bruit d'environnement (comme c'est par exemple le cas en salle de classe ou en amphithéâtre avant le début du cours), la corrélation entre stimulus et réponse neuronale décroît dramatiquement chez les non-musiciens alors que ce n'est pas le cas chez les musiciens qui montrent donc une résistance plus importante au bruit (Parbery-Clark, Skoe, & Kraus, 2009 ; Bidelman and Krishnan, 2010). De plus, sur la base de la réponse du colliculus inférieur, il est possible de distinguer des phonèmes

---

<sup>2</sup> Le faisceau olivocochleaire a ses origines dans le complexe olivaire supérieur, situé dans le pont du tronc cérébral, et contient les axons efférents qui descendent jusqu'à la cochlée où ils vont innover l'organe de Corti.

tels que « ba », « da » et « ga », mais uniquement chez les musiciens (Parbery-Clark, Tierney, Strait, & Kraus, 2012). Cela ne veut pas dire que les non-musiciens n'entendent pas la différence entre « ba » et « da », mais plutôt que cette différence est traitée d'une manière plus fine, robuste et consistante chez les musiciens (Kraus & Chandrasekaran, 2010). *In fine*, la pratique musicale pendant l'enfance, semble maintenir son effet sur le fonctionnement du colliculus car des adultes ayant eu une pratique musicale au cours de leur enfance présentent une réponse aux sons plus marquée et précise que des non-musiciens (Strait, O'Connell, Parbery-Clark, & Kraus, 2013).

Lorsque l'on s'intéresse à l'éducation, le problème de la perception de la parole se pose, et notamment dans le contexte de la classe. On sait bien que les classes ne sont pas un lieu acoustique idéal pour l'instruction : le bruit excède souvent les limites recommandées (Knecht, Nelson, Whitelaw, & Feth, 2002) et des niveaux élevés de bruit sont souvent liés à des performances dégradées dans des tests généraux standardisés (Shield & Dockrell, 2008). La perception de la parole dans le bruit devient donc une compétence indispensable qui permet à l'enfant de comprendre ce qui se dit dans la classe. Alors que le bruit retarde la réponse neurale à la parole, une étude récente a mis en évidence que deux ans de pratique musicale en milieu scolaire (chez des adolescents) ont pour effet de réduire la latence de la réponse sous corticale. Ces résultats montrent que l'éducation de la musique au sein même de la classe peut être une cause de la perception améliorée de la parole observée chez les musiciens. Cette étude est d'autant plus importante que les bénéfices ne sont pas limités à un contexte de cours de musique particuliers, difficile d'accès et souvent onéreux, mais peuvent être obtenus pendant l'adolescence, et certainement encore plus pendant l'enfance, à un coût relativement convenable et dans une configuration de pratique en groupe (Tiernay, Krizman, Skoe, Johnston, & Kraus, 2013).

Quand on s'intéresse au cortex auditif, il n'est ainsi plus très étonnant de trouver des différences liées à la pratique musicale, car ces différences existent déjà bien en amont. Au niveau du cortex, la représentation du signal sonore est plus abstraite, donc moins fidèle au stimulus. Ceci est dû au fait que notre système perceptif doit être capable de catégoriser les sons en différentes classes, ce qui nous permet de reconnaître le mot « maison » lorsqu'il est prononcé par une femme, un homme ou un enfant. Donc des signaux très différents sur le plan acoustique sont perçus de la même façon et catégorisés, car *in fine*, le langage doit faire du sens.

Des mesures directes de l'activité neuronale ont mis en évidence que l'activité du cortex auditif en réponse à des sons de piano est plus importante chez les pianistes que chez un groupe de non-musiciens. Ces modifications des représentations des sons sont très sensibles à l'instrument joué par le musicien. Chez un violoniste par exemple, l'activité corticale déclenchée par le son d'un violon sera supérieure à celle déclenchée par le son d'une trompette (et vice-versa). Cette sensibilité au timbre serait due, d'une part, à la plus grande familiarité qu'un musicien possède avec le son de son propre instrument et, d'autre part, à l'attention qu'il porte sur la qualité du son produit: les populations de neurones très sollicités se réorganisent et deviennent plus efficaces. Ces différences entre musiciens et non-musiciens ont été montrées chez l'adulte tout comme chez l'enfant (Pantev et al., 1998 ; Koelsch, Schröger, & Tervaniemi, 1999 ; Trainor, Shahin, & Roberts, 2003 ; Shahin, Bosnyak, Trainor, & Roberts, 2003 ; Shahin, Roberts, & Trainor, 2004). Alors que la sensibilité au son de l'instrument pratiqué augmente notablement, des différences fonctionnelles ont aussi été observées en utilisant des voyelles et des consonnes (Reinke, He, Wang, & Alain, 2003 ; Chobert, Marie, François, Schön, & Besson, 2011). Elles suggèrent donc que les différences observées dans l'analyse du signal de parole au niveau du colliculus, continuent à exister et se propagent au niveau d'une représentation catégorielle plus abstraite du signal de parole. Ces résultats vont aussi nous fournir une explication pour les résultats d'autres études montrant une forte corrélation entre compétences musicales et phonologiques (Anvari, Trainor, Woodside, & Levy, 2002 ; Slevc & Miyake, 2006).

Les différences fonctionnelles et structurelles étant étroitement liées, les musiciens ont une plus haute densité de matière grise que les non-musiciens dans une région (la partie antérieure du gyrus de Heschl) qui correspond à l'aire auditive primaire, la première étape du traitement du son dans le cortex, après son traitement par le système auditif sous-cortical (Schneider et al., 2005).

Une question qui est souvent posée est de savoir si les modifications du cortex, exposées précédemment, sont le résultat d'une pratique intensive de la musique, ou seraient simplement dues à des prédispositions génétiques. Si effectivement il ne suffit pas de jouer du violoncelle pendant 8 heures par jour pour devenir Pablo Casals ou d'étudier la composition pendant des années pour devenir Jean-Sébastien Bach, la

plupart des résultats confirment l'importance de la pratique de la musique. En effet il existe un lien très fort entre d'une part l'ampleur des modifications cérébrales observées au niveau du colliculus, des cortex auditif et somatosensoriel, et d'autre part l'âge auquel l'enfant commence à apprendre un instrument et donc le nombre d'années de pratique. Plus l'enfant commence à jouer tôt, plus la pratique est longue et plus le cerveau se modifie. En tous les cas, s'il existe certainement des prédispositions génétiques pour la musique, la pratique musicale suffit à modifier le fonctionnement d'un cerveau normal. En effet, plusieurs études récentes ont démontré l'effet causal (et pas simplement corrélationnel) de la pratique musicale sur les fonctions et structures cérébrales. Par exemple, Hyde et al. (2009) ont montré que 15 mois de pratique instrumentale suffisaient pour observer des modifications du cortex moteur, auditifs et du corps calleux, et que ces modifications vont de paire avec une amélioration des compétences motrices, rythmiques et mélodiques.

Ainsi, la pratique musicale agit sur les circuits cérébraux impliqués dans la musique. Cela paraît presque banal et sans intérêt si l'on considère la musique comme un monde à part, un art divin réservé à une élite et avec peu de choses partagées avec le monde des communs mortels. Cette vision est erronée et la musique partage plusieurs processus perceptifs, moteurs et cognitifs avec d'autres fonctions complexes, en particulier avec le langage.

### **Transfert d'apprentissage**

En effet, sur un plan sonore, musique et langage utilisent la hauteur tonale, le timbre et des structures temporelles précises pour véhiculer l'information. Sur un plan plus cognitif, musique et langage nécessitent des compétences mnésiques et attentionnelles similaires, mais également la capacité d'intégrer des événements dans une structure temporelle, tout en prenant en compte des règles « syntaxiques », c'est-à-dire une grammaire. Les neuroscientifiques ont abordé la comparaison de la musique et du langage de deux façons différentes : d'une part, en comparant le traitement des processus communs au langage et à la musique en parallèle et d'autre part, en cherchant à savoir si un entraînement musical pourrait avoir des effets bénéfiques sur le traitement du langage (aux niveaux perceptuel et cognitif).

Une des premières questions posées a été de voir si le fait d'avoir une perception fine de la hauteur tonale, nécessaire à la justesse en musique, pouvait avoir un effet sur la perception de la prosodie du langage et plus précisément sur la perception de

l'intonation du langage oral. Une série d'études a montré que les enfants et les adultes avec une pratique instrumentale sont plus sensibles aux patrons prosodiques de la parole par rapport aux participants sans « parcours » de pratique musicale. Ces résultats obtenus chez l'adulte (Schön, Magne, & Besson, 2004) et l'enfant (Magne, Schön, & Besson, 2006) ont pu être confirmés dans une étude longitudinale (Moreno et al. 2009). L'approche longitudinale est importante, car comme l'on vient de le dire, elle permet de faire des inférences causales et pas simplement corrélationnelles. Un groupe d'enfant est donc testé avant l'apprentissage et ensuite divisé en deux sous-groupes, l'un faisant de la musique, l'autre une activité contrôle, ludique et artistique (en générale peinture ou théâtre). Tandis que les enfants ne présentaient pas de différence avant la phase d'entraînement, les enfants avec entraînement musical étaient plus sensibles aux fines modifications des hauteurs (pour la musique et la parole) que les enfants qui avaient suivi des cours de peinture (Moreno et al. 2009). De plus, ce transfert semble avoir lieu indépendamment des connaissances de la langue. En effet, les musiciens arrivent mieux à percevoir des modifications de la hauteur dans leur langue maternelle mais aussi dans une langue qu'ils ne connaissent pas, ce qui pourrait leur faciliter l'apprentissage d'une langue étrangère (Marques, Moreno, Castro, & Besson, 2007 ; Slevc & Miyake, 2006).

Si l'on reconsidère les données décrites ci-dessus concernant la plasticité du colliculus inférieur et du cortex auditif, on voit bien que le fait d'avoir une représentation du son plus précise et plus résistante au bruit au niveau sous-cortical permet d'avoir une représentation plus fidèle de l'intonation dans la parole. Un tel effet de la pratique musicale ne se limite pas à l'intonation, mais semble jouer un rôle sur d'autres aspects de la parole, tels que les formants vocaliques, les transitoires rapides qui permettent de distinguer les consonnes (e.g., [da], [ta]) et également sur la sélection (filtrage attentionnel) de l'information pertinente (Kraus & Chandrasekaran, 2010 ; Parbery-Clark, Strait, & Kraus, 2011). Au niveau du cortex auditif, des différences fonctionnelles ont été observées en utilisant des sons musicaux, des voyelles et des consonnes (Reinke et al., 2003 ; Chobert et al., 2011). De plus, il semble y avoir un chevauchement important des réseaux impliqués dans le traitement des phonèmes et des mélodies au niveau du cortex temporal (gauche et droit, Schön et al., 2010), ce qui explique assez bien les résultats montrant une forte corrélation entre compétences musicales et traitement phonologique (Anvari et al., 2002 ; Slevc & Miyake, 2006).

Le transfert de la musique au langage ne semble pas se limiter à la perception des sons. Patel (2003) a proposé un parallèle entre structures harmoniques dans la musique et structures syntaxiques dans le langage. Bien que les règles soient différentes, la mise en œuvre d'une structure temporelle permettant de créer des liens entre les différents événements successifs (notes d'un côté et mots de l'autre) serait très similaire. Plusieurs recherches ont étudié la perception des structures syntaxiques en comparant des structures correctes respectant les règles du système à des structures qui les transgressent. La présentation du début d'une phrase ou d'une mélodie permettait à l'auditeur de développer des attentes perceptives sur les types d'événements qui devraient suivre afin de respecter les structures du système. Ainsi, des études en neurophysiologie ont montré que les transgressions de structures linguistiques et musicales évoquent des composantes électrophysiologiques similaires (Friederici, Wang, Herrman, Maess, & Oertel, 2000 ; Koelsch Gunter, Friederici, & Schröger, 2000). Ces marqueurs électrophysiologiques semblent être générés au niveau du cortex frontal inférieur (l'aire de Broca et son homologue à droite, Koelsch Fritz, Schulze, Alsop, & Schlaug, 2005 ; Koelsch, & Mulder, 2002 ; Maess, Koelsch, Gunter, & Friederici, 2001 ; Tillmann, Janata, & Bharucha, 2003 ; Tillmann et al., 2006). Une manipulation des structures musicales évoque une activation du cortex frontal inférieur plus forte pour un accord inattendu qu'un accord attendu (Koelsch & Mulder, 2002 ; Koelsch et al., 2005 ; Tillmann et al., 2003), un résultat similaire à ce qui a été observé pour des mots syntaxiquement inattendus (e.g., Kotz, Frisch, von Cramon, & Friederici, 2003). Les régions frontales inférieures sont elle même intégrées dans un réseau neuronal plus large comprenant les régions temporales et pariétales. Pour le traitement du langage, un réseau neuronal comparable a été décrit (Friederici, 2002, pour une revue). Le parallèle des deux systèmes neuronaux pour le traitement de la musique et du langage (Besson & Schön, 2003 ; Patel, Gibson, Ratner, Besson, & Holcomb, 1998) peut être interprété sur la base de leurs similarités structurelles. Le recouvrement des corrélats neuronaux semblerait refléter des processus nécessaires pour l'intégration structurelle, notamment au cours du temps. Cette hypothèse a été testée par des études qui analysaient l'interférence entre les structures musicales et linguistiques lorsque les participants devaient traiter les deux informations simultanément (Slevc, Rosenberg, & Patel, 2009 ; Hoch, Poulin-Charronnat, & Tillmann, 2011). Elle a reçu également du soutien supplémentaire par des études montrant d'une part une amélioration du traitement des structures

linguistiques pour des enfants musiciens (Jentschke & Koelsch, 2009 ; Fitzroy & Sanders, 2013), d'autre part un déficit du traitement des structures musicales pour des patients aphasiques et des patients dysphasiques (Patel, Iversen, Wassenaar, & Hagoort, 2008 ; Jentschke, Koelsch, Sallat, & Friederici, 2008).

Musique et langage partagent aussi certaines structures temporelles. Bien que la musique soit plus régulière et rythmée, la parole a aussi son rythme qui pourrait être défini comme étant l'organisation temporelle des accents, et sa métrique, l'alternance entre les syllabes accentuées et non-accentuées. Si ces aspects rythmiques de la langue peuvent paraître marginaux, il a été montré que les bébés sont déjà capables de discriminer des langues avec des rythmes différents de leur langue (Nazzi & Ramus, 2003). De plus, ces aspects sont fortement liés et influencent d'autres niveaux du traitement du langage, tel que la sémantique (Magne et al., 2007) et la syntaxe (Schmidt-Kassow & Kotz, 2009).

Port (2003) a proposé qu'il existe dans la parole, une synchronie entre oscillateurs internes (neuronaux) et les structures rythmiques vocaliques. Dans ce modèle, les ressources attentionnelles seraient préférentiellement allouées aux instants où les syllabes accentuées sont attendues. Il existe en effet une régularité temporelle dans la parole qui facilite la perception (Pitt & Samuel, 1990 ; Quené & Port, 2005) et la production (Cummins & Port, 1998). L'hypothèse serait donc que la perception de la métrique et plus généralement l'attention temporelle pourrait dépendre de mécanismes similaires pour le traitement de la musique et du langage (Cason & Schön, 2012). Une telle hypothèse de transfert d'apprentissage de la musique aux aspects métriques de la parole via des réseaux cérébraux communs a été testée et validée en montrant que les musiciens traitent la structure métrique des mots mieux que les non-musiciens (Marie, Magne, & Besson, 2011). Ces meilleures compétences rythmiques sont aussi probablement à l'origine des meilleures compétences de segmentation de la parole chez les musiciens (François & Schön, 2011). En effet, les musiciens, quand ils écoutent une langue qu'ils n'ont jamais entendue, arrivent à segmenter (c.a.d. extraire) les mots contenus dans le flot de parole plus rapidement et précisément que les non-musiciens. Après seulement un an de pratique musicale, les enfants améliorent ce type de compétences (François, Chobert, Besson, & Schön, 2012). Cette habilité de segmentation, savoir où un mot se termine et l'autre commence, est primordiale dans l'apprentissage de la langue maternelle chez le bébé (Saffran et al., 1996) mais aussi dans l'apprentissage d'une langue étrangère chez

l'adulte et l'enfant. Pour finir, la musique semble améliorer l'extraction des émotions d'un discours. En effet, des enfants de sept ans ayant suivi un an de cours de piano reconnaissent mieux les émotions exprimées dans des phrases que des enfants qui n'ont pas eu de cours de musique (Thompson, Schellenberg, & Husain, 2004).

### Les conditions du transfert

Comment expliquer les modifications induites par la pratique musicale sur les processus perceptifs et cognitifs? Patel (2011) émet l'hypothèse selon laquelle l'apprentissage de la musique conduirait à des effets de plasticité touchant la parole et le langage dès lors que 5 conditions sont réunies. Ces conditions sont : 1) Le chevauchement ou recouvrement de ressources (Overlap; il y a chevauchement anatomique des réseaux qui traitent l'information musicale et langagière) ; 2) Précision: la musique repose sur une plus forte demande de ces réseaux en comparaison avec la parole, particulièrement en terme de précision (traitement de la durée, de la hauteur et du timbre) ; 3) Emotion: l'activité musicale qui repose sur ces réseaux engendre de fortes émotions positives qui permettent en retour de faciliter les phénomènes de plasticité synaptique (Shepard, Kilgard, & Liu, 2013) ; 4) Répétition: les gestes musicaux activant ces réseaux sont hautement répétés ; 5) Attention: les activités musicales qui reposent sur ces réseaux sont associées à une attention focalisée. Ceci donne lieu à l'hypothèse OPERA : dès lors que ces cinq conditions sont réunies, la plasticité cérébrale amène les réseaux en question à fonctionner avec une précision plus importante que pour la parole ordinaire et le traitement de la parole en bénéficie puisque les réseaux sont partagés. Emotion, répétition et attention ont souvent été associées à une augmentation de la libération de neurotransmetteurs tels que la dopamine, l'acétylcholine, et la norépinephrine (également la sérotonine), qui contribuent tous d'une manière ou d'une autre à la plasticité cérébrale. Pour résumer, l'hypothèse OPERA propose qu'une plus forte demande de ressources induite par la pratique musicale sur certains processus sensoriels et cognitifs partagés avec la parole soit à l'origine des améliorations de son traitement. Dès lors que cette demande de ressources est associée à une récompense émotionnelle, une répétition intensive et une attention focalisée, ces modifications ont lieu via des mécanismes de plasticité neurale dépendants de l'expérience.

Parmi ces aspects, les aspects émotionnels et stimulant de la musique semblent jouer un rôle clef. Schellenberg (2003 ; 2006) a proposé que la musique puisse engendrer un état émotionnel propice au bon fonctionnement global du cerveau, et de cette manière agir sur les capacités cognitives. Cette proposition est née après la parution d'une étude très controversée ayant montré un effet positif produit par la simple écoute de Mozart sur le QI (l'effet Mozart : Rauscher, Shaw, & Ky, 1993 ; voir également Pasquinelli, ce volume). Dans cette étude initiale, après l'écoute de la Sonate pour deux pianos en Ré majeur de Mozart, des enfants présentaient une amélioration de leurs habiletés de raisonnement visuo-spatial. Schellenberg et collaborateurs ont par la suite montré que cet effet n'était pas spécifique à la musique de Mozart, mais qu'il est reproductible avec des morceaux dynamiques et à valence positive (joyeux), ce qui augmenterait le niveau d'éveil, mais n'est pas reproductible avec une musique à valence négative (triste) (Schellenberg, Nakata, Hunter, & Tamoto, 2007). L'effet facilitateur induit par l'écoute d'une musique agréable a été démontré pour différentes compétences cognitives (pour une revue voir Latendresse, Larivée, & Miranda, 2006). La musique semble ainsi agir sur les composantes neurophysiologiques associées à l'état de stress en diminuant le taux de cortisol. (Khalfa, Bella, Roy, Peretz, & Lupien, 2003), et peut aussi entraîner la libération de dopamine (Salimpoor, Benovoy, Larcher, Dagher, & Zatorre, 2011). Certains auteurs proposent même que les modifications neurophysiologiques liées à l'écoute musicale puissent favoriser la neurogénèse, la régénération et la réparation des neurones et circuits neuronaux via l'ajustement des sécrétions hormonales (comme le cortisol, la testostérone et l'œstrogène, Fukui & Toyoshima, 2008).

### Musique et stimulation cognitive

Les recherches montrant des ressources neuronales partagées entre le traitement de la musique et du langage, les liens observés entre l'entraînement musical et les performances sur un ensemble de tâches linguistiques (voir Besson, Chobert, & Marie, 2011 ; Kraus & Chandrasekaran, 2010 ; Herholtz & Zatorre, 2012) ainsi que l'hypothèse OPERA, amènent à penser qu'il est possible d'utiliser la musique afin de stimuler le traitement de processus sensoriels et cognitifs et en particulier les processus langagiers. Alors que le monde de l'éducation semble encore

sourd à ces découvertes et ces faits, tout du moins au niveau de ses hauts dirigeants, le monde de la rééducation, sans doute plus proche de celui de la recherche, a déjà commencé à réagir.

Un exemple assez proche du monde de l'éducation est celui de la dyslexie.

### Musique et dyslexie

Overy (2000 ; 2003) a été la première à proposer un programme d'entraînement musical rythmique à court terme à des enfants dyslexiques. Bien que l'étude ait été réalisée sur un petit échantillon d'enfants, elle a montré une amélioration des performances phonologiques connues pour être déficitaires chez l'enfant dyslexique. En effet, il est également connu que les enfants dyslexiques et dysphasiques sont déficitaires dans des tâches rythmiques et métriques (Huss, Verney, Fosker, Mead, & Goswami, 2011). L'hypothèse est que ces déficits rythmiques pourraient entraîner des difficultés à traiter certains indices acoustiques de la parole tel que le voisement nécessaire à distinguer un « ba » d'un « pa », mais aussi des difficultés à utiliser des indices plus intégrés permettant par exemple d'extraire des syllabes et des mots d'un flot de parole (Corriveau & Goswami, 2009 ; Thomson & Goswami, 2008). Ceci a amené plusieurs chercheurs à émettre l'hypothèse selon laquelle le déficit de la lecture observé chez les dyslexiques serait principalement dû à un déficit de l'élaboration temporelle, c'est-à-dire de part un système perceptif fonctionnant avec une résolution temporelle trop faible pour traiter l'information langagière (Huss, Verney, Fosker, Mead, & Goswami, 2011). L'amélioration des compétences rythmiques via la pratique de la musique pourrait donc avoir un rôle bénéfique causal sur le développement des compétences phonologiques du langage (Corriveau & Goswami, 2009). Plusieurs études récentes vont dans cette direction : corrélation entre compétences musicales et phonologiques (Slevc & Miyake, 2006), meilleure discrimination de syllabes par les musiciens (Chobert, François, Velay, & Besson, 2012 ; Zuk, Andrade, Andrade, Gardiner, & Gaab, 2013), effet bénéfique de la pratique musicale sur les compétences de segmentation de la parole et de lecture chez l'enfant normo-lecteur en âge scolaire (François et al., 2012 ; Moreno et al., 2009) et préscolaire (Degé & Schwarzer, 2011), jusqu'aux études récentes avec des enfants dyslexiques sans groupe de contrôle (Cogo-Moreira, Brandão, de Ávila, Ploubidis, & Mari, 2013) et avec groupe de contrôle (Flaunacco et al., en révision).

Tous ces résultats sont donc très prometteurs particulièrement pour une population d'enfants dyslexiques qui ont des difficultés de discrimination de phonèmes, de segmentation de parole et de lecture.

La stimulation rythmique semble avoir un effet bénéfique également sur le traitement syntaxique des enfants présentant des troubles développementaux du langage (Przybylski et al., 2013). Dans cette étude, des amorces musicales (de brefs extraits de musique joués par des percussions) étaient construites de telle façon que l'extraction métrique (donc la perception d'une régularité temporelle sous-jacente) était facile ou difficile. L'amorce musicale était suivie par une phase de test dans laquelle des phrases présentées oralement et pour lesquelles il fallait juger de la grammaticalité ou pas de la phrase. L'hypothèse est que la rythmicité de l'amorce musicale pourrait influencer l'attention temporelle des participants (via des oscillateurs internes neuronaux) et que cette influence pourrait perdurer dans le temps, améliorant ainsi les performances dans la tâche de grammaticalité après les amorces faciles et pas après les amorces difficiles (en renforçant des processus liés au traitement phonologique, la segmentation et le traitement de la syntaxe). Les résultats des enfants dysphasiques et dyslexiques confirment cette hypothèse : les performances des enfants sont meilleures après les amorces faciles, régulières qu'après les amorces difficiles, irrégulières.

L'ensemble de ces résultats ainsi que ceux d'autres programmes d'entraînement musical (e.g., Overy, 2000) sont encourageants et devraient motiver le monde de la recherche en neuroscience et en éducation à mener plus d'études sur l'influence d'une stimulation rythmique sur le traitement du langage. L'observation d'effets inter-domaines au cours du temps (voir aussi Cason & Schön, 2012) suggère également les bénéfices de l'utilisation de la stimulation musicale rythmique dans des programmes d'entraînement, en plus de l'accentuation directe des structures rythmiques dans un matériel linguistique (comme dans la poésie, par exemple). Ainsi, il serait possible d'exploiter aussi les avantages motivationnels et hédoniques qu'un matériel musical pourrait apporter dans une situation de réhabilitation.

### Musique, intelligence et fonctions exécutives

A la lumière du bénéfice de la pratique musicale sur des fonctions très complexes (e.g., lecture), on peut se poser la question de savoir si la musique pourrait

avoir un effet bénéfique sur l'intelligence en général et sur les fonctions exécutives en particulier. Schellenberg (2004) a ainsi étudié trois groupes d'enfants qui ont suivis des cours de musique ou de théâtre ainsi qu'un groupe de contrôle sans activité extrascolaire. Les enfants ayant suivi les cours de musique ont montré une augmentation plus importante du quotient intellectuel (QI) sur l'échelle Wechsler. Depuis cette étude princeps, un certain nombre de chercheurs se sont intéressés aux effets de la pratique musicale sur les fonctions exécutives, terme englobant mémoire de travail, attention, planification ou inhibition de la réponse, solution de problème (problem solving), flexibilité et changement de tâche (task switching). En particulier, compte tenu du fait que les capacités attentionnelles sont un bon prédicteur du QI et d'autres comportements complexes, elle a fait l'objet de nombreuses études (Schweizer et al., 2000, Stankov et al., 1994). Certaines études montrent ainsi une amélioration de la mémoire verbale chez les musiciens, mais pas des aspects visuels de la mémoire de travail (Tierney, Bergeson-Dana, & Pisoni, 2008 ; Parbery-Clark, Skoe, Lam, & Kraus, 2009 ; Strait, Krauss, Parbery-Clark, & Ashley, 2010). D'autres études suggèrent que l'effet bénéfique de la pratique musicale ne se cantonne pas au domaine auditif et ont révélé que les musiciens ont une mémoire accrue aussi bien pour des tâches auditives que visuelles (George & Coch, 2011 ; Bidelman, Hutka, & Moreno, 2013).

Une autre composante des fonctions exécutives ayant reçu un certain intérêt est l'attention et les processus d'inhibition de l'information non pertinente. Cela a ainsi été étudié avec des tâches de type Stroop, dans lesquelles un stimulus porteur de deux types d'informations (e.g., le mot « ROUGE » écrit en jaune ou le mot « aigu » prononcé avec une fréquence grave) doit être traité en ignorant l'information non pertinente qui change en fonction des consignes. Les musiciens sont ainsi meilleurs dans ce genre de tâche car arriveraient à mieux inhiber l'une ou l'autre dimension du stimulus (Bialystok & Depape, 2009). Ce type de bénéfice a aussi été montré chez l'enfant après un seul mois de pratique de la musique (Moreno et al., 2011). D'autres travaux renforcent encore un peu plus ces résultats en soutenant l'idée que certains aspects des fonctions exécutives, en particulier la régulation des ressources attentionnelles, jouent un rôle important dans la médiation entre apprentissage de la musique, plasticité auditive et les fonctions cognitives complexes accrues chez le musicien (e.g., l'intelligence, Degé & Schwarzer, 2011). En effet une optimisation des ressources attentionnelles pourrait avoir des effets "top-down". Ceci veut dire

littéralement “du haut vers le bas”, et indique le fait que le traitement d'un stimulus perçu est influencé par les connaissances et les expériences passées. En d'autres termes, le traitement d'un stimulus auditif, même au niveau sous-cortical, serait modulé par la voie corticofugale descendante, qui, dans sa partie corticale, ne se limiterait pas au cortex auditif primaire, mais impliquerait un réseau plus vaste touchant par exemple l'attention (auditive) et les modifications de mémoire induites par nos expériences multi-sensorielles avec les sons.

Ceci est particulièrement évident lorsque l'on s'intéresse à la perception catégorielle des phonèmes. En effet, deux phonèmes appartenant à deux catégories différentes (e.g., "b" et "p") seront perçus comme étant bien différents l'un de l'autre alors que deux autres phonèmes d'une même catégorie (e.g., un "t<sub>1</sub>" et un "t<sub>2</sub>") seront perçus comme étant très similaires, indépendamment du fait que dans les deux cas, les phonèmes sont à la même distance dans un espace acoustique. Ce phénomène repose sur l'amélioration sélective de discrimination de contrastes inter-catégoriels, induit via l'exposition à la langue maternelle (long terme) ou via des expositions plus courtes dans des contextes d'apprentissage, probablement influencé par l'activité du cortex préfrontal sur le système auditif (Myers & Swan, 2012). D'une manière similaire, on peut imaginer que la pratique de la musique pourrait exercer une influence positive sur le traitement de la parole grâce à un contrôle accru des fonctions exécutives sur le système auditif.

Pour conclure, en ces temps où la refonte du système éducatif français est recommandé par le rapport PISA 2012 montrant que le niveau scolaire des élèves de 15 ans est en train de chuter drastiquement par rapport à 2003, nous espérons vous avoir un peu plus sensibilisé au bénéfice de la musique et de sa pratique en reportant tout un ensemble de preuves montrant que la pratique musicale développe des capacités cognitives et perceptives non spécifiques à la musique : les enfants et les jeunes adultes qui ont joué d'un instrument ont une meilleure représentation de l'intonation de leur langue, un vocabulaire plus riche, lisent mieux et apprennent eux aussi plus facilement une langue étrangère. L'apprentissage de la musique facilite aussi la perception de la parole dans le bruit, tâche qui requiert notamment de savoir discriminer différentes sources sonores et d'avoir une bonne attention sélective. Pour autant, nous avons passé sous silence les aspects socioculturels liés à la pratique

instrumentale : on joue avec d'autres, on joue pour soi, mais aussi pour les autres. Cet aspect social de la musique est sans doute primordial dans l'éducation en général. Tous ces résultats devraient inciter le monde de l'éducation à accorder un rôle beaucoup plus important à l'enseignement de la musique. La musique devrait cesser d'être une discipline négligée dans le cursus scolaire. Sans bouleverser les emplois du temps des élèves et à peu de frais, il pourrait être envisageable de favoriser cette activité sociale et ludique qui, en même temps qu'elle crée des millions de nouvelles connexions dans le cerveau, renforce les liens (et des liens de qualité) entre les hommes.

## Références

- Anvari, S., Trainor, L., Woodside, J., & Levy, B. (2002). Relations among musical skills, phonological processing, and early reading ability in preschool children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 83(2), 111–130.
- Aslin, R. N. (2000, July). Interpretation of infant listening times using the headturn preference technique. Paper presented at the International Conference on Infant Studies, Brighton, England.
- Besson, M., & Schön, D. (2003). Comparison between language and music. In R. Zatorre & I. Peretz, (Eds.), *The biological foundations of music* (pp. 267–293). Oxford: Science and Medical Publications, Oxford University Press.
- Besson, M., Chobert, J., & Marie, C. (2011). Transfer of Training between Music and Speech: Common Processing, Attention, and Memory. *Frontiers in Psychology*, 2(94). doi:10.3389/fpsyg.2011.00094
- Bidelman, G. M., & Krishnan, A. (2010). Effects of reverberation on brainstem representation of speech in musicians and non-musicians. *Brain Research*, 1355, 112–125.
- Bidelman, G. M., Hutka, S., & Moreno, S. (2013). Tone language speakers and musicians share enhanced perceptual and cognitive abilities for musical pitch: evidence for bidirectionality between the domains of language and music. *PloS One*, 8(4), e60676.
- Bosch, L. (2012). Precursors to language in preterm infants: Speech perception abilities in the first year of life. *Progress in Brain Research*, 189, 239–257.

- Bialystok, E., & Depape, A. M. (2009). Musical expertise, bilingualism, and executive functioning. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 35(2), 565–574.
- Cason, N., Schön, D. (2012). Rhythmic priming enhances the phonological processing of speech. *Neuropsychologia*, 50(11), 2652–2658.
- Chelli, D., Chanoufi, B (2008). Fetal audition. Myth or reality, *J Gynecol Obstet Biol Reprod (Paris)*, 37(6), 554-8.
- Cheour, M., Ceponiene, R., Lehtokoski, A., Luuk, A., Allik, J., Alho, K., & Näätänen, R. (1998). Development of language-specific phoneme representations in the infant brain. *Nature Neuroscience*, 1(5), 351–353.
- Chobert, J., Marie, C., François, C., Schön, D., & Besson, M. (2011). Enhanced passive and active processing of syllables in musician children. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(12), 3874–3887.
- Chobert, J., François, C., Velay, J.L., Besson, M. (2012). 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*. Advance online publication. doi:10.1093/cercor/bhs377
- Cogo-Moreira, H., Brandão de Ávila, C. R., Ploubidis, G. B., & Mari, J. J.. (2013). Effectiveness of music education for the improvement of reading skills and academic achievement in young poor readers: a pragmatic cluster-randomized, controlled clinical trial. *Plos One*. 8(3), e59984.
- Corriveau, K. H., & Goswami, U. (2009). Rhythmic motor entrainment in children with speech and language impairments: tapping to the beat. *Cortex*, 45(1), 119-130.
- Cummins, F. & Port, R. F. (1998). Rhythmic constraints on stress timing in English. *Journal of Phonetics*, 26(2), 145–171.
- Degé, F., & Schwarzer, G. (2011). The effect of a music program on phonological awareness in preschoolers. *Frontiers in Psychology*, 2(124). doi:10.3389/fpsyg.2011.00124
- Draganova, R., Eswaran, H., Murphy, P., Huotilainen, M., Lowery, C., & Preissl, H. (2005). Sound frequency change detection in fetuses and newborns, a Magnetoencephalographic study. *NeuroImage*, 28(2), 354361.

- 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*(5234), 305–307.
- Fernald, A. (1992). Human maternal vocalizations to infants as biologically relevant signals. In J. Barkow, L. Cosmides, & J. Tooby, (Eds.), *The adapted mind: Evolutionary psychology and the generation of culture* (pp. 391–428). Oxford, England: Oxford University Press.
- Fitzroy, A. B., & Sanders, L. D. (2013). Musical expertise modulates early processing of syntactic violations in language. *Frontiers in Psychology*, *3*(603). doi:10.3389/fpsyg.2012.00603
- Flaugnacco, E., Lopez, L., Montico, M., Terribili, C., Zoia, S., & Schön, D. (en revision). Music training increases phonological awareness and reading skills in developmental dyslexia. Manuscript submitted for publication.
- Francois, C., & Schön, D. (2011). Musical expertise boosts implicit learning of both musical and linguistic structures. *Cerebral Cortex*, *21*(10), 2357–2365.
- François, C., Chobert, J., Besson, M., & Schön, D. (2013). Music training for the development of speech segmentation. *Cerebral Cortex*, *23*(9), 2038–2043.
- Friederici, A. D., Wang, Y., Herrmann, C. S., Maess, B., & Oertel, U. (2000). Localization of early syntactic processes in frontal and temporal cortical areas: a magnetoencephalographic study. *Human Brain Mapping*, *11*(1), 1–11.
- Friederici, A. D. (2002). Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends in Cognitive Sciences*, *6*(2), 78–84.
- Fukui, H., & Toyoshima, K. (2008). Music facilitate the neurogenesis, regeneration and repair of neurons. *Medical Hypotheses*, *71*(5), 765–769.
- George, E. M., & Coch, D. (2011). Music training and working memory: an ERP study. *Neuropsychologia*, *49*(5), 1083–1094.
- Granier-Deferre, C., Ribeiro, A., Jacquet, A. Y., & Bassereau, S. (2011). Near-term fetuses process temporal features of speech. *Developmental Science*, *14*(2), 336–352.
- Hannon, E. E., & Trehub, S. E. (2005). Tuning in to musical rhythms: infants learn more readily than adults. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *102*(35), 12639–12643.

- Hayes, J. R., & Clark, H. H. (1970). Experiments in the segmentation of an artificial speech analog. In J. R. Hayes (Ed.), *Cognition and the Development of language* (pp. 221–234). New-York, NY: Wiley.
- Herold, B., Höhle, B., Walch, E., Weber, T., & Obladen, M. (2008). Impaired word stress pattern discrimination in very-low-birthweight infants during the first 6 months of life. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *50*(9), 678–683.
- Herholz, S. C., & Zatorre, R. J. (2012). Musical training as a framework for brain plasticity: behavior, function, and structure. *Neuron*, *76*(3), 486–502.
- Hoch, L., Poulin-Charronnat, B., & Tillmann, B. (2011). The influence of task-irrelevant music on language processing: syntactic and semantic structures. *Frontiers in Psychology*. *2*(112). doi: 10.3389/fpsyg.2011.00112
- Huotilainen, M., Kujala, A., Hotakainen, M., Parkkonen, L., Taulu, S., Simola, J., ... Näätänen, R. (2005). Short-term memory functions of the human fetus recorded with magnetoencephalography. *Neuroreport*, *16*(1), 81–84.
- Huss, M., Verney, J. P., Fosker, T., Mead, N., & Goswami, U. (2011). Music, rhythm, rise time perception and developmental dyslexia: perception of musical meter predicts reading and phonology. *Cortex*, *47*(6), 674–689.
- Hyde, K. L., Lerch, J., Norton, A., Forgeard, M., Winner, E., Evans, A. C., & Schlaug, G. (2009). Musical training shapes structural brain development. *Journal of Neuroscience*, *29*(10), 3019–3025.
- Jentschke, S., Koelsch, S., Sallat, S., & Friederici, A. D. (2008). Children with specific language impairment also show impairment of music-syntactic processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *20*(11), 1940–1951.
- Jentschke, S., & Koelsch, S. (2009). Musical training modulates the development of syntax processing in children. *NeuroImage*, *47*(2), 735–744.
- Jusczyk, P. (2000). *The Discovery of Spoken Language*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Khalfa, S., Bella, S. D., Roy, M., Peretz, I., & Lupien, S. J. (2003). Effects of relaxing music on salivary cortisol level after psychological stress. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *999*, 374–376.
- Kisilevsky, B. S., Hains, S. M., Lee, K., Xie, X., Huang, H., Ye, H. H., ... Wang, Z. (2003). Effects of experience on fetal voice recognition. *Psychological Science*, *14*(3), 220–224.

- Kisilevsky, B. S., Hains, S. M., Brown, C. A., Lee, C. T., Cowperthwaite, B., Stutzman, ... Wang Z. (2009). Fetal sensitivity to properties of maternal speech and language. *Infant behavior & Development*, 32(1), 59–71.
- Knecht, H. A., Nelson, P. B., Whitelaw, G. M., & Feth, L. L. (2002). Background noise levels and reverberation times in unoccupied classrooms: predictions and measurements. *American Journal of Audiology*, 11(2), 65–71.
- Koelsch, S., Schröger, E., & Tervaniemi, M. (1999). Superior pre-attentive auditory processing in musicians. *Neuroreport*, 10(6), 1309–1313.
- Koelsch, S., Gunter, T., Friederici, A. D., & Schröger, E. (2000). Brain indices of music processing: "nonmusicians" are musical. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(3), 520–541.
- Koelsch, S., & Mulder, J. (2002). Electric brain responses to inappropriate harmonies during listening to expressive music. *Clinical Neurophysiology*, 113(6), 862–869.
- Koelsch, S., Fritz, T., Schulze, K., Alsop, D., & Schlaug, G. (2005). Adults and children processing music: an fMRI study. *NeuroImage*, 25(4), 1068–1076.
- Kotz, S. A., Frisch, S., von Cramon, D. Y., & Friederici, A. D. (2003). Syntactic language processing: ERP lesion data on the role of the basal ganglia. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 9(7), 1053–1060.
- Kuhl, P. K. (2004). Early language acquisition: cracking the speech code. *Nature Review Neuroscience*, 5(11), 831–843.
- Kraus, N., & Chadrasekaran, B. (2010). Music training for the development of auditory skills. *Nature Review Neuroscience*, 11(8), 599–605.
- Latendresse, C., Larivée, S., & Miranda, D. (2006). The range of the "Mozart effect". Successful memories, false notes and recovery. *Canadian Psychology*, 47(2), 125–141.
- Lieberman, M., & Pierrehumbert, J. (1984). Intonational invariance under changes in pitch range and length. In M. Aronoff & R. Oerhle (Eds), *Language Sound Structure* (pp. 157–223). Cambridge, MA: MIT Press.
- Lynch, M. P., Eilers, R. E., Kimbrough Oller, D., & Urbano, R. C. (1990). Innateness, experience, and music perception. *Psychological Science*, 1(4), 272–276.

- Lynch, M. P., & Eilers, R. E. (1992). A study of perceptual development for musical tuning. *Perception and Psychophysics*, *52*, 599–608.
- Maess, B., Koelsch, S., Gunter, T. C., & Friederici, A. D. (2001). Musical syntax is processed in Broca's area: an MEG study. *Nature Neuroscience*, *4*(5), 540–545.
- Magne, C., Schön D., & Besson M. (2006). Musician children detect pitch violations in both music and language better than nonmusician children: behavioral and electrophysiological approaches. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*(2), 199–211.
- Magne, C., Astésano, C., Aramaki, M., Ystad, S., Kronland-Martinet, R., & Besson M. (2007). Influence of syllabic lengthening on semantic processing in spoken French: behavioral and electrophysiological evidence. *Cerebral Cortex*, *17*(11), 2659–2668.
- Marie, C., Magne, C., & Besson, M. (2011). Musicians and the metric structure of words. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*(2), 294–305.
- Marques, C., Moreno, S., Castro, S. L., & Besson, M. (2007). Musicians detect pitch violation in a foreign language better than nonmusicians: behavioral and electrophysiological evidence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *19*(9), 1453–1463.
- Moreno, S., Marques, C., Santos, A., Santos, M., Castro, S. L., & Besson, M. (2009). Musical training influences linguistic abilities in 8-year-old children: more evidence for brain plasticity, *Cerebral Cortex*, *19*(3), 712–713.
- Moreno, S., Bialystok, E., Barac, R., Schellenberg, E. G., Cepeda, N. J., & Chau, T. (2011). Short-term music training enhances verbal intelligence and executive function. *Psychological Science*, *22*(11), 1425–1433.
- Musacchia, G., Sams, M., Skoe, E., & Kraus, N. (2007). Musicians have enhanced subcortical auditory and audiovisual processing of speech and music. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *104*(40), 15894–15898.
- Myers, E. B., & Swan, K. (2012). Effects of category learning on neural sensitivity to non-native phonetic categories. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *24*(8), 1695–1708.
- Nazzi, T., & Ramus, F. (2003). Perception and acquisition of linguistic rhythm by infants. *Speech Communication*, *41*(1), 233–243.

- Newman, R., Ratner, N. B., Jusczyk, A. M., Jusczyk, P. W., & Dow, K. A. (2006). Infants' early ability to segment the conversational speech signal predicts later language development: a retrospective analysis. *Developmental Psychology*, 42(4), 643–655.
- Overy, K. (2000). Dyslexia, Temporal Processing and Music; The potential of music as an early learning aid for dyslexic children, *Psychology of Music*, 28(2), 218–229.
- Overy, K. (2003). Dyslexia and Music: From Timing Deficits to Musical Intervention. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 999, 497–505.
- Pantev, C., Oostenveld, R., Engelien, A., Ross, B., Roberts, L. E., & Hoke, M. (1998). Increased auditory cortical representation in musicians. *Nature*, 392(6678), 811–814.
- Parbery-Clark, A., Skoe, E., & Kraus, N. (2009). Musical experience limits the degradative effects of background noise on the neural processing of sound. *Journal of Neuroscience*, 29(45), 14100–14107.
- Parbery-Clark, A., Skoe, E., Lam, C., & Kraus, N. (2009) Musician enhancement for speech in noise. *Ear and Hearing*, 30(6), 653–661.
- Parbery-Clark, A., Strait, D. L., & Kraus, N. (2011). Context-dependent encoding in the auditory brainstem subserves enhanced speech-in-noise perception in musicians. *Neuropsychologia*, 49(12), 3338–3345.
- Parbery-Clark, A., Tierney, A., Strait, D. L., & Kraus, N. (2012). Musicians have fine-tuned neural distinction of speech syllables. *Neuroscience*, 219, 111–119.
- Patel, A. D. (2003). Language, music, syntax and the brain. *Nature Neuroscience*, 6(7), 674–681.
- Patel, A. D., Gibson, E., Ratner, J., Besson, M., & Holcomb, P. J. (1998). Processing syntactic relations in language and music: An event-related potential study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10(6), 717–733.
- Patel, A. D., Iversen, J. R., Wassenaar, M., & Hagoort, P. (2008). Musical syntactic processing in agrammatic Broca's aphasia. *Aphasiology*, 22(7-8), 776–789.
- Patel, A. D. (2011). Why would Musical Training Benefit the Neural Encoding of Speech? The OPERA Hypothesis. *Frontiers in Psychology*, 2(142). doi: 10.3389/fpsyg.2011.00142

- Perrot, X., & Collet, L. (2013). Function and plasticity of the medial olivocochlear system in musicians: A review. *Hearing Research*, 308, 27–40. doi:10.1016/j.heares.2013.08.010.
- Pitt, M. A., & Samuel, A. G. (1990). The use of rhythm in attending to speech. *Journal of Experimental psychology. Human perception and performance*, 16(3), 564–573.
- Polka, L., & Werker, J. F. (1994). Developmental changes in perception of nonnative vowel contrasts. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(2), 421–435.
- Port, R. F. (2003). Meter and speech. *Journal of phonetics*. 31(3), 599–611.
- Przybylski, L., Bedoin, N., Krifi-Papoz, S., Herbillon, V., Roch, D., Léculier, L., ... Tillmann, B. (2013). Rhythmic auditory stimulation influences syntactic processing in children with developmental language disorders. *Neuropsychology*, 27(1), 121–131.
- Quené, H., & Port, R. F. (2005). Effects of timing regularity and metrical expectancy on spoken-word perception. *Phonetica*, 62(1), 1–13.
- Rauscher, F. H., Shaw, G. L., & Ky, K. N. (1993). Music and spatial task performance. *Nature*, 365(6447), 611.
- Reinke, K. S., He, Y., Wang, C., & Alain, C. (2003). Perceptual learning modulates sensory evoked response during vowel segregation. *Cognitive Brain Research*, 17(3), 781–791.
- Ridding, M. C., Brouwer, B., & Nordstrom, M. A. (2000). Reduced interhemispheric inhibition in musicians. *Experimental Brain Research*, 133(2), 249–253.
- Saffran, J. R., Aslin, R. N., & Newport, E. L. (1996). Statistical learning by 8-month old infants. *Science*, 274(5294), 1926–1928.
- Saffran, J. R., Johnson, E., Aslin, R., & Newport, E. (1999). Statistical learning of tone sequences by human infants and adults. *Cognition*, 70(1), 27–52.
- Salimpoor, V. N., Benovoy, M., Larcher, K., Dagher, A., & Zatorre, R. J. (2011). Anatomically distinct dopamine release during anticipation and experience of peak emotion to music. *Nature Neuroscience*, 14(2), 257–262.

- Sansavini, A., Bertocini, J., & Giovanelli, G. (1997). Newborns discriminate the rhythm of multisyllabic stressed words. *Developmental Psychology*, 33(1), 3–11.
- Sansavini, A., Guarini, A., Justice, L. M., Savini, S., Broccoli, S., Alessandroni, R., & Faldella, G. (2010). Does preterm birth increase a child's risk for language impairment? *Early Human Development*, 86(12), 765–772.
- Schellenberg, E. G. (2003). Does exposure to music have beneficial side effects? In I. Peretz & R. J. Zatorre (Eds.), *The cognitive neuroscience of music* (pp. 430–448). Oxford, UK: Oxford University Press.
- Schellenberg, E. G. (2004). Music lessons enhance IQ. *Psychological Science*, 15, 511–514.
- Schellenberg, E. G. (2006). Long-term positive associations between music lessons and IQ. *Journal of Educational Psychology*, 98(2), 457–468.
- Schellenberg, E. G., Nakata, T., Hunter, P. G., & Tamoto, S. (2007). Exposure to music and cognitive performance: Tests of children and adults. *Psychology of Music*, 35(1), 5–19.
- Schlaug, G., Jäncke, L., Huang, Y., & Steinmetz, H. (1995). In vivo evidence of structural brain asymmetry in musicians. *Science*, 267(5198), 699–701.
- Schmidt-Kassow, M., & Kotz, S. A. (2009). Event-related brain potentials suggest a late interaction of meter and syntax in the P600. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(9), 1693–1708.
- Schneider, P., Sluming, V., Roberts, N., Scherg, M., Goebel, R., Specht, H. J., ... Rupp, A. (2005). Structural and functional asymmetry of lateral Heschl's gyrus reflects pitch perception preference. *Nature Neuroscience*, 8(9), 1241–1247.
- Schön, D., Boyer, M., Moreno, S., Besson, M., Peretz, I., & Kolinsky, R. (2008). Songs as an aid for language acquisition. *Cognition*, 106(2), 975–983.
- Schön, D., Magne, C., & Besson, M. (2004). The music of speech: music training facilitates pitch processing in both music and language. *Psychophysiology*, 41(3), 341–349.
- Schön, D., Gordon, R., Campagne, A., Magne, C., Astésano, C., Anton, J. L., & Besson M. (2010). Similar cerebral networks in language, music and song perception. *NeuroImage*, 51(1), 450–461.

- Shahin, A., Bosnyak, D. J., Trainor, L. J., & Roberts, L. E. (2003). Enhancement of neuroplastic P2 and N1c auditory evoked potentials in musicians. *Journal of Neuroscience*, *23*(13), 5545–5552.
- Shahin, A., Roberts, L. E., & Trainor, L. J. (2004). Enhancement of auditory cortical development by musical experience in children. *Neuroreport*, *15*(12), 1917–1921.
- Shepard, K. N., Kilgard, M. P., & Liu, R. C. (2013). Experience-dependent plasticity and auditory cortex. In Y. E., Cohen, A. N. Popper & R. R. Fay (Eds.), *Springer Handbook of Auditory Research: Vol. 45. Neural Correlates of Auditory Cognition* (pp. 293–327), New York, NY: Springer.
- Shield, B. M., & Dockrell, J. E. (2008). The effects of environmental and classroom noise on the academic attainments of primary school children. *The Journal of the Acoustical Society of America* *123*(1), 133–144.
- Shukla, M., White, K. S., & Aslin, R. N. (2011). Prosody guides the rapid mapping of auditory word forms onto visual objects in 6-mo-old infants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *108*(15), 6038–6043.
- Singh, L., Reznick, J. S., & Xuehua, L. (2012). Infant word segmentation and childhood vocabulary development: a longitudinal analysis. *Developmental Science*, *15*(4), 482–495.
- Slevc, L. R., & Miyake, A. (2006). Individual differences in second-language proficiency: Does musical ability matter? *Psychological Science*, *17*(8), 675–681.
- Slevc, L. R., Rosenberg, J. C., & Patel, A. D. (2009). Making psycholinguistics musical: self-paced reading time evidence for shared processing of linguistic and musical syntax. *Psychonomic Bulletin & Review* *16*(2), 374–381.
- Schweizer, K., Zimmermann, P., & Koch, W. (2000). Sustained attention, intelligence and the crucial role of perceptual processes. *Learning and Individual Differences*, *12*, 271–286
- Stankov, L., Roberts, R., & Spilsbury, G. (1994). Attention and speed of test-taking in intelligence and aging. *Personality and Individual Differences*, *17*, 273–284.
- Strait, D. L., Kraus, N., Parbery-Clark, A., & Ashley, R. (2010) Musical experience shapes top-down auditory mechanisms: evidence from masking and auditory attention performance. *Hearing Research*, *261*(1), 22–29.

- Strait, D. L., O'Connell, S., Parbery-Clark, A., & Kraus, N. (2013). Musicians' Enhanced Neural Differentiation of Speech Sounds Arises Early in Life: Developmental Evidence from Ages 3 to 30. *Cerebral Cortex*. Advance online publication. doi:10.1093/cercor/bht103
- Thiessen, E. D., Hill, E., & Saffran, J. R. (2005). Infant-directed speech facilitates word segmentation. *Infancy*, 7(1), 53–71.
- Thompson, W. F., Schellenberg, E. G., & Husain, G. (2004). Decoding speech prosody: do music lessons help? *Emotion*, 4(1), 46–64.
- Thomson, J. M., & Goswami, U. (2008). Rhythmic processing in children with developmental dyslexia: auditory and motor rhythms link to reading and spelling. *Journal of Physiology-Paris*, 102(1), 120–129.
- Tierney, A., Bergeson-Dana, T. R., & Pisoni, D. B. (2008). Effects of Early Musical Experience on Auditory Sequence Memory. *Empirical musicology review*, 3(4), 178–186.
- Tierney, A., Krizman, J., Skoe, E., Johnston, K., & Kraus, N. (2013) High school music classes enhance the neural processing of speech. *Frontiers in Educational Psychology*, 4(855). doi: 10.3389/fpsyg.2013.00855.
- Tillmann, B., Janata, P., & Bharucha, J. J. (2003). Activation of the inferior frontal cortex in musical priming. *Cognitive Brain Research*, 16(2), 145–161.
- Tillmann, B., Koelsch, S., Escoffier, N., Bigand, E., Lalitte, P., Friederici, A. D., & von Cramon, D. Y. (2006). Cognitive priming in sung and instrumental music: activation of inferior frontal cortex. *NeuroImage*, 31(4), 1771–1782.
- Trainor, L. J. (1996). Infant preferences for infant-directed versus non-infant-directed play songs and lullabies. *Infant Behavior and Development*, 19(1), 83–92.
- Trainor, L. J., Austin, C. M., & Desjardins, N. (2000). Is infant-directed speech a result of the vocal expression of emotion? *Psychological Science*, 11(3), 188–195.
- Trainor, L. J., Shahin, A., & Roberts, L. E. (2003). Effects of musical training on the auditory cortex in children. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 999, 506–513.

- Werker, J. F., & Tees, R. (1984). Cross-language speech perception: evidence for perceptual reorganization during the first year of life. *Infant Behavior and Development*, 7(1), 49–63.
- Zuk, J., Andrade, P. E., Andrade, O. V., Gardiner, M., & Gaab, N. (2013). Musical, language, and reading abilities in early Portuguese readers. *Frontiers in Psychology*, 4(288). doi: 10.3389/fpsyg.2013.00288