

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

EFFETS DE LA PRATIQUE MUSICALE
SUR LE RAPPEL ACTIF AUDITIF DE L'ENFANT:
UNE ÉTUDE DE POTENTIELS ÉVOQUÉS

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN KINANTHROPOLOGIE

PAR
ANIK PAQUET

SEPTEMBRE 2017

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.07-2011). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier ma directrice de recherche, Geneviève Cadoret, Ph.D., professeure au département des sciences de l'activité physique ainsi que ma codirectrice France Simard, Ph.D., professeure-associée au département de musique de l'Université du Québec à Montréal. Vos précieux conseils m'ont permis de développer une rigueur scientifique nécessaire à l'élaboration de ce mémoire. De plus, votre aide lors de chacune des étapes de ce projet de recherche ainsi que vos encouragements lors des obstacles rencontrés m'ont apporté un soutien précieux.

En deuxième lieu, je remercie sincèrement les enfants, leurs parents ainsi que les professeurs d'instruments de musique pour leur précieuse collaboration. Votre participation a permis de réaliser la collecte de données sans laquelle il eut été impossible d'obtenir ces résultats encourageants et sans précédent qui, je l'espère, auront un impact positif dans le milieu de l'éducation musicale.

Des remerciements sincères aussi au personnel de soutien de l'UQÀM. Merci à Jill Vandermeerschen, la statisticienne de l'UQÀM, pour son souci de m'expliquer clairement les concepts complexes de son domaine ainsi que sa rigueur. Merci à Carole Roy, technicienne de laboratoire, qui nous a généreusement offert son temps et son expérience avec la technique de l'EEG. Merci à Robin Drolet, technicien en électrotechnique, pour son précieux support en informatique et électronique. Merci à Benoît Sansregret, technicien aux travaux pratiques, pour sa contribution efficace.

Enfin, je remercie du fond du coeur mes enfants et mon conjoint d'avoir consenti de bonne grâce à sacrifier du temps familial pour cette noble cause qu'est la recherche scientifique dans le domaine de l'enseignement de la musique.

Ce projet de recherche ne fut pas toujours un long fleuve tranquille. L'objectif principal de cette étude expérimentale visait à mesurer les effets de la pratique du violon et du violoncelle chez l'enfant d'âge scolaire sur une tâche de rappel actif auditif. Le temps alloué pour effectuer cette recherche de deuxième cycle universitaire étant en moyenne de deux ans, la nature transversale de l'étude allait de soi. L'ouvrage a exigé une rigueur de tous les instants. Certaines étapes imposèrent des défis de taille. La programmation de la tâche dura quatre mois, la transposition du protocole sur le rappel visuel déjà existant vers un protocole de rappel auditif se révéla plus complexe que prévu. La recherche de participants correspondant aux critères stricts ne se fit pas sans heurts non plus : malgré les contacts établis avec plus d'une quarantaine de professeurs de violon privés de la grande région de Montréal, nous avons dû étendre nos recherches à une plus grande région géographique afin de réunir un nombre suffisant de participants ainsi que d'inclure non pas seulement des violonistes, mais aussi des violoncellistes. Quelques problèmes informatiques lors de la collecte de données nous ont aussi causé du fil à retordre. Néanmoins, les yeux rivés vers nos objectifs, les obstacles furent vaincus et les résultats furent des plus satisfaisants.

Au nom des enfants qui en bénéficieront, merci à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet de recherche.

À mon conjoint,
et tous les autres professeurs d'instrument de musique.

L'essence de votre travail est fondamentale
pour l'équilibre entre le coeur, le corps et la pensée
des citoyens de demain.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	i
LISTE DE FIGURES	viii
LISTE DE TABLEAUX	x
RÉSUMÉ	xi
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	3
REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Rappel actif	3
1.1.1 Études de neuroimagerie chez l'adulte	4
1.1.2 Étude chez l'animal	6
1.1.3 Études de lésions	6
1.1.4 Aspects développementaux du rappel actif	8
1.2 Effets de la pratique musicale	10
1.2.1 Définition du musicien	10
1.2.2 Pratique musicale et modifications neuroanatomiques	11
1.2.3 Pratique musicale et modifications fonctionnelles	16
1.3.1 Effets mnésiques généraux	20
1.3.2 Effets mnésiques auditifs chez l'adulte	24
1.4 Pratique musicale : effets sur le développement de la mémoire auditive	25
1.4.1 Développement de la perception auditive	25
1.4.2 Pratique musicale et effets développementaux sur la mémoire auditive	27
1.4.3. Pertinence de la recherche	28
CHAPITRE II	30
MÉTHODOLOGIE	30
2.1 Objectifs	30
2.1.1 Questions de recherche	30
2.1.2 Hypothèses	31

2.2 Sélection des participants.....	31
2.2.1 Critères d'inclusion	31
2.2.2 Critères d'exclusion	32
2.2.3 Considérations éthiques	33
2.2.4 Caractéristiques des participants.....	34
2.3 Design expérimental	34
2.3.1 Contrôle des variables.....	35
2.3.2 Questionnaires préexpérimentaux.....	36
2.3.3 Tests comportementaux	36
2.3.4 Tâche de rappel actif auditif.....	37
2.3.5 Plan expérimental.....	42
2.4 Matériel expérimental	43
2.4.1 Enregistrements et diffusion des stimuli	43
2.4.2 Électroencéphalographie (EEG) et potentiels évoqués.....	44
2.5 Résumé de la procédure	45
2.5.1 Entreposage des données	46
2.6 Analyses	46
2.6.1 Analyses des données comportementales	46
2.6.2 Analyses des données expérimentales	47
CHAPITRE III	50
RÉSULTATS	50
3.1 Données comportementales	50
3.1.1 Gordon's Primary Measure of Music Audiation	50
3.1.2 WISC-IV	52
3.1.3 Tâche expérimentale : données comportementales.....	56
3.2 Données électroencéphalographiques	63
CHAPITRE IV	66
DISCUSSION	66
4.1 Première hypothèse.....	66
4.2 Deuxième hypothèse	71
4.3 Troisième hypothèse	72

4.4 Discussion générale.....	74
4.5 Limites et forces de la recherche.....	75
CONCLUSION.....	78
ANNEXE A : QUESTIONNAIRE PARENT	79
ANNEXE B : FORMULAIRE DE CONSENTEMENT	82
ANNEXE C : CERTIFICAT D'ACCOMPLISSEMENT ÉTHIQUE.....	87
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	88

LISTE DE FIGURES

Figure	Page
1.1 Schéma représentant l'interaction entre le cortex préfrontal midventrolatéral SII et PF (Tirée de Kostopoulos <i>et al.</i> , 2007)	5
1.2a Effets des lésions frontales et temporales sur les performances mnésiques (Tirée de Chapados et Petrides, 2015)	7
1.2b Performances mnésiques moyennes des personnes ayant des lésions dans le cortex préfrontal ventrolatéral (VLPFC), dorsomédian (DMPFC) et dans d'autres régions du cortex préfrontal (FC) comparativement à un groupe contrôle (HC) (Tirée de Chapados et Petrides, 2015)	8
1.3 Différences relatives de matière grise entre les musiciens professionnels, les musiciens amateurs et les non-musiciens adultes dans trois régions du cortex Gyrus précentral gauche (PreG L); Gyrus de Heschl gauche (HG L); Cortex pariétal supérieur droit (SPC R) (Tirée de Gaser et Schlaug, 2003)	13
1.4 Différences anatomiques dans la région du gyrus précentral entre des musiciens adultes pianistes et violonistes. (Tirée de Schlaug <i>et al.</i> , 2005).....	14
1.5a et 1.5b Augmentations du nombre de voxels des enfants musiciens après 15 mois d'entraînement musical. (Tirée de Hyde <i>et al.</i> , 2009)	15
1.6 Association de la pratique musicale durant l'enfance avec les réponses neuronales aux stimuli auditifs chez l'adulte (Tirée de Skoe et Kraus, 2012)	18
1.7 Différences perceptuelles et mnésiques entre enfants musiciens et non musiciens (Tirée de Strait <i>et al.</i> , 2012)	20
2.1 Tâche de rappel actif auditif	38
2.2 Correspondance entre les fréquences et les notes du piano. (Tirée de Abromont et De Montalbert, 2001)	41

3.1	Résultats du test de discrimination auditive Gordon's PMMA (1979, 1986), mesurant la différence entre deux suites de sons sur les composantes de hauteur (tonal), de durée (rythme) et la moyenne des deux composantes (composite).....	51
3.2	Scores moyens par groupes de participants aux sous-tests du WISC-IV : rappel de chiffres en ordre direct et indirect (Chiffres), lettres et chiffres en ordre indirect (Lettres et chiffres), séries de chiffres en ordre direct (SCOD), séries de chiffres en ordre indirect (SCOI). Les équivalents des sommes des scores d'équivalence ont été obtenus selon des intervalles de confiance à 95%	53
3.3	Indices de mémoire de travail (IMT). Les scores d'équivalence ont été obtenus selon des intervalles de confiance à 95 %.....	54
3.4	Empans de rappels sériels : chiffres en séries les plus longues, en ordre direct (SCDL) ou indirect (SCIL)	55
3.5	Taux de réussite sur la tâche de rappel actif auditif pour les essais de rappel et les essais contrôles.....	59
3.6	Comparatif des taux de réussite durée vs fréquence	60
3.7	Temps de réaction moyens (TR) en condition de rappel et de contrôle.....	62
3.8	Effets de tâche au niveau frontal et pariétal. Potentiels moyens enregistrés au niveau frontal gauche (F3) et pariétal droit (P8) chez les musiciens et les non-musiciens. Le temps 0 ms correspond à l'initiation de l'indice visuel	64
3.9	Potentiels moyens enregistrés comparant les conditions contrôle et rappel de la fréquence dans les régions frontales (F3) et pariétales (P8)	65

LISTE DE TABLEAUX

Tableau		Page
2.1	Description globale de la tâche de rappel actif auditif	42
2.2	Répartition des stimuli entre les blocs d'essais	43
3.1	Scores moyens par groupe de participants aux sous-tests du WISC-IV : rappel de chiffres en ordre direct et indirect (Chiffres %), lettres et chiffres en ordre indirect (Lettres et chiffres %), séries de chiffres en ordre direct (SCOD), séries de chiffres en ordre indirect (SCOI), indice de mémoire de travail (IMT) et rangs percentiles (RgPC)	52
3.2	Résultats aux tests t des échantillons indépendants pour les performances du WISC-IV. Le test t pour l'égalité des moyennes a été obtenu avec un intervalle de confiance selon la différence à 95%	56
3.3	Statistiques descriptives indiquant les moyennes des taux de réussite des deux groupes pour les essais de rappel et les essais contrôles selon un intervalle de confiance à 95% pour les comparaisons multiples	58
3.4	Statistiques descriptives indiquant les moyennes des temps de réaction en millisecondes (ms) sur les différentes tâches en condition de rappel et de contrôle	61

RÉSUMÉ

La recherche en neurosciences nous permet aujourd'hui de mieux comprendre les bénéfices qu'apporte l'apprentissage d'un instrument de musique sur les fonctions exécutives en général et sur la mémoire de travail en particulier. Bien qu'un certain nombre d'études démontrent des effets positifs de la pratique instrumentale sur la mémoire de travail chez l'adulte, très peu d'études se sont penchées sur les effets chez l'enfant. La mémoire de travail est un ensemble de processus qui implique non seulement le stockage temporaire de l'information, mais aussi sa manipulation, engageant des habiletés cognitives complexes. Un de ces processus est la capacité d'isoler en mémoire ou de sélectionner une information particulière. Ce processus qualifié de rappel actif est connu pour engager le cortex préfrontal chez l'adulte.

L'objectif de cette étude était d'examiner les effets de la pratique musicale au violon ou au violoncelle sur une des composantes de la mémoire de travail, soit le rappel actif auditif et d'enregistrer par électroencéphalographie (EEG) l'activité neurologique associée à ce rappel. Quarante (40) enfants musiciens et non-musiciens, âgés de 7 à 11 ans, ont participé à l'étude. Les musiciens devaient recevoir des leçons privées de violon ou violoncelle et s'entraîner sur leur instrument depuis au moins 14 mois. Les deux groupes ont été évalués en prétests sur une tâche de discrimination auditive ainsi qu'aux tâches des sous-tests de mémoire de travail du WISC-IV. L'expérimentation consistait pour les enfants à effectuer une tâche de rappel actif dans laquelle ils devaient se rappeler de la hauteur ou de la durée d'un son vocal entendu préalablement.

Les résultats aux prétests démontrent que les musiciens avaient une meilleure discrimination auditive que les non-musiciens pour des séries de sons purs. Aux sous-tests de mémoire de travail du WISC-IV, il n'y avait pas de différence entre les deux groupes. Lors de la tâche expérimentale, les musiciens ont obtenu un meilleur taux de succès que les non-musiciens pour se souvenir des caractéristiques d'une information verbale auditive et avaient un temps de réaction plus court.

Les analyses électroencéphalographiques (EEG) ont démontré une activation neurologique différente entre musiciens et non musiciens. La principale différence pendant la période de rappel était localisée dans l'hémisphère cérébral gauche en région frontale à une latence d'environ 500 ms. Le rappel actif était associé avec une négativité soutenue chez les non-musiciens qui n'apparaissait pas chez les musiciens. Dans l'ensemble, ces résultats démontrent que la pratique musicale au violon et au violoncelle chez l'enfant influence positivement le rappel actif auditif et l'activité neurologique associée à ce rappel témoigne de la différence entre musiciens et non musiciens.

MOTS-CLÉS : mémoire de travail, EEG, pratique musicale, musique, enfants.

INTRODUCTION

Un musicien allie constamment une signification aux sons qu'il entend. L'analyse continue de ce qu'il entend change la façon dont son système nerveux répond aux sons. Depuis les vingt dernières années, de nombreuses études ont montré les effets positifs de l'apprentissage d'un instrument de musique sur la plasticité et le développement du cortex cérébral, notamment sur les fonctions cognitives, somesthésiques et motrices. Pour l'élève, étudier la musique est un outil de prédilection pour ses apprentissages. Par sa valence émotionnelle, par son mode de transmission auditif, la musique est porteuse d'une signature mnésique qui s'inscrit dans la durée. La pratique musicale requiert également la séquentialité et la simultanéité de plusieurs fonctions cérébrales : vision, planification et exécution de l'action motrice, intégration d'un *feedback* multimodal, ajustements moteurs, mémorisation et parfois d'autres fonctions lors de l'improvisation. Cette symphonie de tâches accomplies et harmonisées par le corps et la pensée entraîne la modification fascinante de toute une organisation cérébrale reliée à ces fonctions.

Conséquemment, les musiciens bénéficieraient de certains avantages, notamment une plus grande habileté à discriminer et mémoriser les sons entendus qu'ils soient musicaux, verbaux ou de simples bruits. Cependant, la relation entre la pratique musicale et les habiletés mnésiques accrues reste encore débattue sur certains aspects. Les caractéristiques développementales sont peu connues, notamment en ce qui a trait à la mémoire auditive.

Chez l'adulte, des différences significatives dans les réseaux neuronaux des musiciens tendent à démontrer une relation entre la pratique musicale et leurs performances cognitives. Qu'en est-il chez l'enfant? Y aurait-il une période de maturation sur le plan mnésique plus sensible aux influences de l'expérience et de la stimulation musicale? Les études portant sur les effets développementaux de la

pratique musicale chez l'enfant sont peu nombreuses. Celles examinant la relation entre la pratique musicale et les effets sur la mémoire auditive de l'enfant le sont encore moins.

Afin de mieux comprendre comment la pratique musicale influence le développement mnésique de l'enfant, l'objectif de cette recherche était d'examiner les effets de la pratique musicale au violon ou au violoncelle sur le développement de la mémoire auditive et plus spécifiquement sur le rappel actif. Jouer régulièrement du violon ou du violoncelle permet-il à l'enfant de mieux se souvenir des caractéristiques auditives d'un son comparativement à un enfant non musicien? Si oui, ce meilleur rappel est-il dû à un traitement plus efficace de l'information sur le plan neurologique et à un développement plus précoce des mécanismes supportant ce traitement?

Dans ce mémoire de maîtrise, la revue de littérature dressera tout d'abord le portrait des connaissances actuelles sur le rappel actif tel que proposé par Petrides (2002, 2005) et celles relatives à son développement. En second lieu, une revue des effets de la pratique musicale tant sur le plan neuro-anatomique que fonctionnel sera présentée. Sont abordés ensuite les effets mnésiques de la pratique musicale, en couvrant tout d'abord les effets généraux sur les mémoires motrice, visuelle et verbale, puis en ciblant plus spécifiquement les effets documentés sur la mémoire auditive. La dernière section de la revue de littérature décrira les caractéristiques développementales du système auditif et du traitement cérébral auditif pour ensuite présenter les connaissances des effets de la pratique musicale sur la mémoire auditive chez l'enfant-musicien.

Puis, le chapitre relatif à la méthodologie de la recherche fera état des objectifs, des questions et des hypothèses de la présente étude. Le devis expérimental sera décrit ainsi que les résultats d'analyses des données comportementales et électroencéphalographiques. Une discussion dressera enfin le portrait de nos conclusions et ouvrira la voie vers de nouvelles perspectives de recherches.

CHAPITRE I

REVUE DE LITTÉRATURE

Historiquement, la recherche sur la mémoire a distingué les processus qui permettent soit de contrôler ce qui entre en mémoire (processus d'encodage), ce qui maintient l'information en mémoire (processus de stockage et de consolidation) et les processus qui permettent de récupérer l'information mémorisée (les processus de rappel) (Howe, 2015). Ces derniers processus de rappel comprennent la capacité de se souvenir d'un événement ou d'une personne par exemple grâce à la mémoire épisodique ou d'informations sur le monde en général grâce à la mémoire sémantique. Le rappel en mémoire peut être automatique ou exiger un certain effort, ce que Petrides nomme le rappel actif (Petrides, 2002, 2005).

1.1 Rappel actif

Selon Petrides (2002, 2005), l'information en mémoire est intégrée dans un réseau de liens entre les stimuli et entre les stimuli et leurs contextes. Quand les relations entre les stimuli sont stables, fortes et sans ambiguïté, le rappel mnémonique de l'information peut être automatiquement déclenché par les liens associatifs entre les stimuli. Par exemple, si une personne connue est toujours associée avec un lieu précis, la seule évocation de la personne amènera le souvenir du lieu qui est associé à cette personne. À l'inverse, quand les liens entre les stimuli sont interchangeables et équiprobables, un certain degré de contrôle est nécessaire pour isoler un stimulus en mémoire. Si deux personnes peuvent être associées de façon équiprobable avec deux

lieux, le souvenir de l'endroit où telle personne ou telle autre a été rencontrée demande un effort de rappel. Ce type de rappel a été défini comme étant le rappel actif (*active retrieval*).

1.1.1 Études de neuroimagerie chez l'adulte

Plusieurs études d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) ont démontré que le cortex préfrontal ventrolatéral (CPFVL) est spécifiquement actif quand des participants effectuent un rappel actif visuel (Cadoret *et al.*, 2001; Chapados et Petrides, 2015; Kostopoulos et Petrides, 2003) et même tactile (Kostopoulos *et al.*, 2007). Il a été proposé que le rappel actif serait supporté par une modulation descendante exercée par le cortex préfrontal sur les aires associatives postérieures au niveau desquelles les représentations seraient maintenues en mémoire (Kostopoulos *et al.*, 2007; Miyashita, 2004a, 2004b; O'Reilly, 2010). En effet, pour le rappel actif tactile, il a été démontré que le CPFVL exerce un contrôle pour retrouver une information tactile en mémoire en interagissant fonctionnellement avec les aires somatosensorielles secondaires (SII) dans l'operculum pariétal et dans le lobule pariétal inférieur rostral (PF) (Kostopoulos *et al.*, 2007) (fig. 1.1).

1.1.2. Étude chez l'animal

Ces évidences chez l'humain ont été confirmées par des études d'enregistrement neuronal chez le singe (Cadoret et Petrides, 2007). Sur un échantillon de 117 neurones enregistrés dans le CPFVL, 62 % des neurones démontraient une modulation spécifique de leur décharge associée au processus de rappel. De ce groupe de neurones, 49 % étaient plus particulièrement associés à la question amorçant le rappel, 15 % étaient associés au maintien de la sélection en mémoire et 78 % étaient reliés à la décision au moment de la situation test. Ces données ont démontré que des neurones préfrontaux ayant différents patrons de décharge contribuaient au contrôle du rappel actif en mémoire.

1.1.3 Études de lésions

Plus récemment, Chapados et Petrides (2015) ont observé une claire dissociation entre l'effet des lésions frontales et temporales chez des patients lors du rappel actif. En effet, les patients ayant subi des lésions temporales avaient des résultats plus bas que ceux du groupe contrôle et du groupe ayant subi des lésions frontales dans les tâches de reconnaissance visuelle exigeant la rétention de plusieurs stimuli ($n = 24$) pendant un long délai (7000 ms). Ces données sont en accord avec les résultats démontrant que l'hippocampe et ses structures associées sont impliqués dans la rétention en mémoire. Les lésions frontales ne perturbèrent pas de façon significative la reconnaissance d'items. Par contre, la récupération d'éléments en mémoire lorsque ceux-ci étaient reliés par des liens instables et équiprobables était très affectée même si le nombre d'éléments était restreint ($n = 3$) et la durée du maintien en mémoire était courte (1000 ms) (fig.2a).

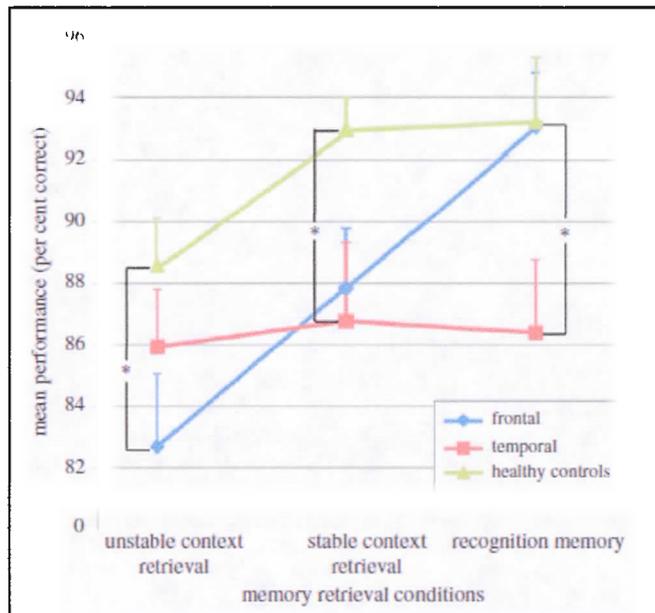


Figure 1.2a Effets des lésions frontales et temporales sur les performances mnésiques (Tirée de Chapados et Petrides, 2015)

Plus spécifiquement, les lésions frontales avaient des effets différents selon leur localisation dans la partie dorsomédiane ou ventrolatérale du cortex préfrontal (fig.1.2b). Les lésions dorsomédiennes gauches engendraient des difficultés de rappel peu importe le contexte, qu'il soit stable ou instable. Celles du cortex ventrolatéral avaient des effets latéralisés, car seules les lésions à droite ont perturbé les performances de récupération en contexte instable ce qui exige un contrôle actif de récupération mnésique. Ces données confirment ainsi les évidences que le CPFVL droit joue un rôle essentiel dans le contrôle du rappel actif. Les fonctions du CPFVL gauche seraient davantage liées au rappel verbal sélectif (Jefferies et Lambon Ralph, 2006).

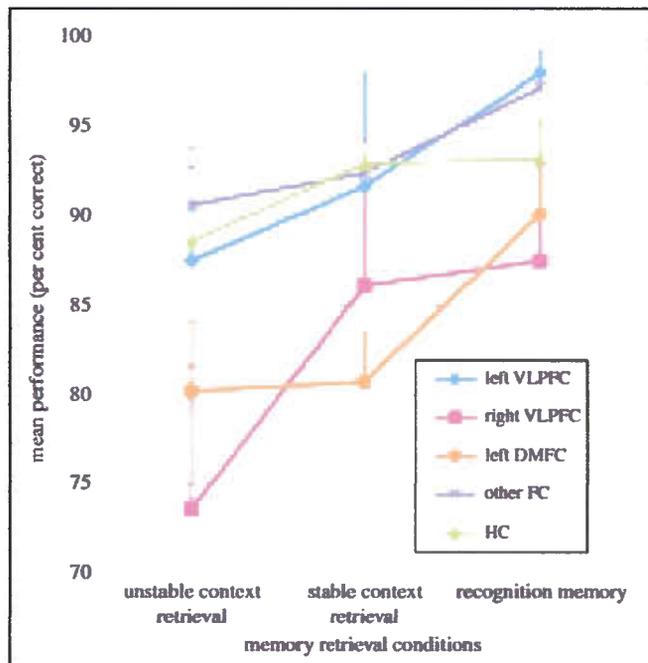


Figure 1.2b Performances mnésiques moyennes des personnes ayant des lésions dans le cortex préfrontal ventrolatéral (VLPFC), dorsomédian (DMPFC) et dans d'autres régions du cortex préfrontal (FC) comparativement à un groupe contrôle (HC) (Tirée de Chapados et Petrides, 2015)

En conclusion, Chapados et Petrides (2015) émettent l'hypothèse selon laquelle il existerait un circuit comprenant l'hippocampe et le cortex temporal médian adjacent, le cortex préfrontal dorsomédian et le cortex préfrontal ventrolatéral au sein duquel chaque structure jouerait un rôle distinct dans le rappel d'information selon le contexte.

1.1.4 Aspects développementaux du rappel actif

Les études développementales sur le rappel actif sont peu nombreuses. La récupération d'information en mémoire est une capacité qui émerge tôt et qui change avec l'âge (Bauer, 2006; Fivush *et al.*, 1987; Hamond et Fivush, 1991). En grandissant, les enfants peuvent de mieux en mieux identifier le caractère unique et

distinctif des événements passés et ne se concentrent plus uniquement sur les habitudes et les caractéristiques communes. Ils fournissent plus d'information sur des détails au sujet des personnes impliquées et de l'endroit où s'est produit l'évènement. Chez les jeunes enfants, le processus de rappel est grandement facilité lorsque les caractéristiques d'un événement sont interreliées. Par exemple, des études ont démontré que les jeunes enfants se rappellent plus facilement les événements passés lorsque les séquences sont ordonnées logiquement, par opposition à des séquences arbitraires (Fivush et Kuebli, 1992). Il a été suggéré que cette facilité de rappel découle du fait que dans le cas des séquences placées en ordre logique, chaque action mémorisée sert d'indice de rappel pour l'action suivante (Mandler, 1983). Dans le cas des séquences arbitraires où les événements ne se ressemblent jamais d'une séquence à l'autre, les enfants ont plus de difficulté à extraire l'information (Fivush et Kuebli, 1992). À l'aide de stimuli composés de mots et d'images, Arterberry et ses collègues (2001) ont également observé une meilleure capacité de rappel chez des enfants de 7 à 8 ans lorsque les éléments de la mémoire partageaient le même thème ou catégorie, par opposition à des éléments non reliés. Lors d'études pilotes, ils ont remarqué que les enfants de 3 à 4 ans étaient beaucoup plus sensibles à cet aspect, obtenant de très faibles résultats lorsque les événements en mémoire n'étaient pas reliés entre eux.

Ces études suggèrent que lorsque les caractéristiques des événements mémorisés sont non reliées ou reliées de manière ambiguë ou arbitraire, les enfants plus jeunes éprouvent plus de difficulté à récupérer l'information en mémoire. Deux études ont examiné spécifiquement le rappel actif chez les enfants (Blain-Briere *et al.*, 2013; Dionne et Cadoret, 2013). Ces études ont montré que le rappel actif visuel, à l'instar d'autres fonctions préfrontales, se développe de façon plus marquée entre l'âge de 6 et 8 ans. Lorsque des enfants de 8 ans devaient se souvenir de la forme ou de la couleur présentée préalablement, leurs résultats étaient identiques à ceux des adultes. Par contre, les enfants de 6 ans faisaient plus d'erreurs et prenaient plus de temps pour répondre. Lorsque les enfants devaient rapporter leur réponse dans une situation test ambiguë, les enfants de 6 ans obtenaient des résultats inférieurs à ceux des enfants de 8 et 11 ans, suggérant un processus de rappel moins sélectif.

Ce développement du rappel actif pourrait-il être influencé par les expériences vécues de l'enfant? Certaines études démontrent que des expériences comme la pratique musicale peuvent avoir des effets bénéfiques sur le développement de la mémoire et sur les substrats neurologiques qui la supportent (Benassi-Werke *et al.*, 2012; Schellenberg et Trehub, 2003; Schulze et Tillmann, 2013; Strait *et al.*, 2012). Les expériences musicales de l'enfant pourraient-elles aussi influencer le développement du rappel actif qui fait partie des fonctions les plus complexes de la mémoire et qui requiert beaucoup de temps pour atteindre sa pleine maturation (Dehaene et Changeux, 2011)? C'est le questionnement qui a conduit à cette recherche.

1.2 Effets de la pratique musicale

Plusieurs travaux ont mis en évidence les nombreux effets neurologiques de la pratique musicale tant d'un point de vue anatomique que fonctionnel. Les prochains points dressent le portrait général de ces recherches. Mais d'abord, définissons ce que l'on entend par *musicien*, en établissant les balises de la pratique musicale.

1.2.1 Définition du musicien

Afin de cerner le cadre de référence terminologique qui nous permet de définir ce qu'est un musicien, nous nous sommes basés sur des études comparant deux groupes, soit les musiciens et les non-musiciens. La majorité des études s'intéressant aux effets de la pratique musicale chez l'adulte considère les caractéristiques suivantes pour définir un musicien : (1) expérience instrumentale d'une durée de plus de 6 ans sans interruption significative (Skoe et Kraus, 2013); (2) fréquence d'entraînement de 3

fois ou plus par semaine (Strait *et al.*, 2015); (3) des leçons privées hebdomadaires (Parbery-Clark *et al.*, 2013); (4) début des leçons avant ou à l'âge de 7 ans (Bailey et Penhune, 2010; Penhune, 2011; Skoe et Kraus, 2012).

Chez l'enfant d'âge scolaire, la tâche est plus complexe. Différentes durées d'entraînement ont été étudiées : 12 à 15 mois (Strait *et al.*, 2013) et 3 à 4 ans (Hyde *et al.*, 2009; Schlaug *et al.*, 2005). L'analyse de ces résultats converge vers un certain consensus. Les effets de la pratique musicale sont considérés comme étant significatifs avec des effets neuroanatomiques (Hyde *et al.*, 2009; Schlaug *et al.*, 2005) et fonctionnels (Skoe et Kraus, 2012) chez l'enfant d'âge scolaire si l'entraînement dure 12 mois minimum sans interruption jusqu'au début de l'étude (Bailey *et al.*, 2014; Strait *et al.*, 2015). Comme chez l'adulte, la fréquence et le début de l'entraînement ainsi que des leçons hebdomadaires font partie des critères à retenir. Nous définirons donc ici l'enfant-musicien comme étant l'enfant jouant de son instrument depuis au moins 14 mois et s'exerçant au moins trois fois par semaine durant au moins 20 minutes. Ces critères seront retenus pour notre recherche.

1.2.2 Pratique musicale et modifications neuroanatomiques

Une des caractéristiques remarquables du cerveau des mammifères est sa capacité à intégrer de nouvelles informations tout au long de la vie pour s'adapter aux exigences de l'environnement. Grâce à la plasticité, qui est la capacité des éléments neurologiques à modifier leurs propriétés en réponse à diverses stimulations (Kandel, 2007), les connexions entre les neurones sont capables de subir des changements rapides en réponse à de nouvelles expériences. L'apprentissage de la musique, entre autres par sa pratique fréquente et répétée, constitue une de ces expériences qui laisse sa marque.

Quoique de nombreux chevauchements fonctionnels et anatomiques des structures cérébrales furent mis en évidence entre le traitement de la musique et d'autres fonctions comme le langage, il existerait une spécificité anatomique mnésique propre à la musique (Platel, 2010; Schlaug *et al.*, 2005; Strait *et al.*, 2012). La section qui suit fait état de ces dernières découvertes, d'abord chez l'adulte puis chez l'enfant.

1.2.2.1 Études chez l'adulte

Plusieurs études ont mis en lumière des différences anatomiques entre musiciens et non-musiciens (Barrett *et al.*, 2013; Strait et Kraus, 2014; Wan et Schlaug, 2013). Des différences structurelles ont été remarquées dans diverses régions du cortex, allant d'une plus grande densité de la matière grise à un plus grand volume de matière blanche dans des régions spécifiques (Groussard *et al.*, 2010; Platel, 2010). Par exemple, les personnes sans entraînement musical durant l'enfance ont une asymétrie cérébrale plus marquée : l'hémisphère gauche présente une augmentation de volume comparativement à l'hémisphère droit (Gaser et Schlaug, 2003; Wan et Schlaug, 2013). Les individus entraînés musicalement possèdent pour leur part des hémisphères de tailles plus équivalentes; cette similitude de proportions s'expliquerait notamment par le besoin d'utiliser les deux côtés du corps de façon égale (Barrett *et al.*, 2013; Gaser et Schlaug, 2003; Hyde *et al.*, 2009; Wan et Schlaug, 2013). Le volume du cervelet chez les musiciens serait plus large, en corrélation avec l'intensité et le temps de pratique musicale. Ces résultats sont en accord avec les rôles moteur et cognitif du cervelet (Groussard *et al.*, 2010; Hyde *et al.*, 2009).

Une plus grande densité de matière grise a également été observée chez les musiciens dans les régions somato-sensorielles, prémotrices, pariétales supérieures et temporales inférieures du cortex cérébral, dans le corps calleux ainsi qu'au niveau

sous-cortical comparativement aux non-musiciens (Gaser et Schlaug, 2003; voir Groussard *et al.*, 2010 pour une revue; Sanes et Woolley, 2011; Steele *et al.*, 2013).

Chez le musicien, le gyrus de Heschl possède un réseau neuronal plus dense dans cette région du système auditif —temporale supérieure— qui est reliée à la capacité de discriminer les variations de fréquences et de détecter des patrons toniques (Gaser et Schlaug, 2003) (fig.1.3).

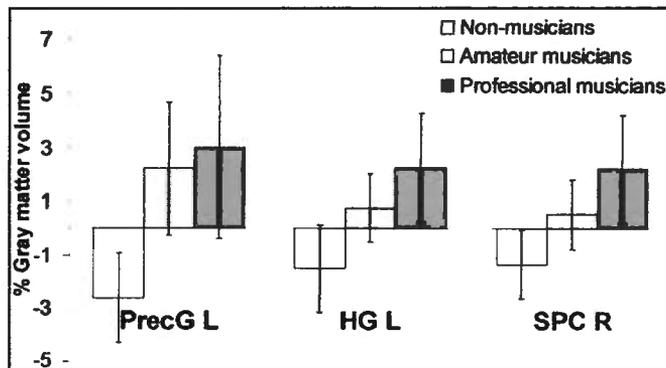


Figure 1.3 Différences relatives de matière grise entre les musiciens professionnels, les musiciens amateurs et les non-musiciens adultes dans trois régions du cortex Gyrus précentral gauche (PreG L); Gyrus de Heschl gauche (HG L); Cortex pariétal supérieur droit (SPC R) (Tirée de Gaser et Schlaug, 2003)

Plusieurs autres auteurs ont observé une plus grande densité de matière grise dans le cortex auditif primaire, le cortex temporal et le cortex prémoteur chez les musiciens (Bailey *et al.*, 2014; P. Schneider *et al.*, 2002). Fait intéressant, les différences structurelles entre les musiciens eux-mêmes reflètent aussi une adaptation aux demandes motrices spécifiques selon le type d'instrument pratiqué (Wan et Schlaug, 2013). Par exemple, la forme d'oméga du gyrus précentral où siègent les représentations des mains et des doigts est plus marquée symétriquement chez les pianistes (dans les deux hémisphères) alors qu'elle est plus marquée dans l'hémisphère droit chez les violonistes, celui qui commande la main gauche. Ce contraste reflète les besoins moteurs différents liés à la pratique de ces deux types d'instruments (Schlaug *et al.*, 2005) (fig.1.4).

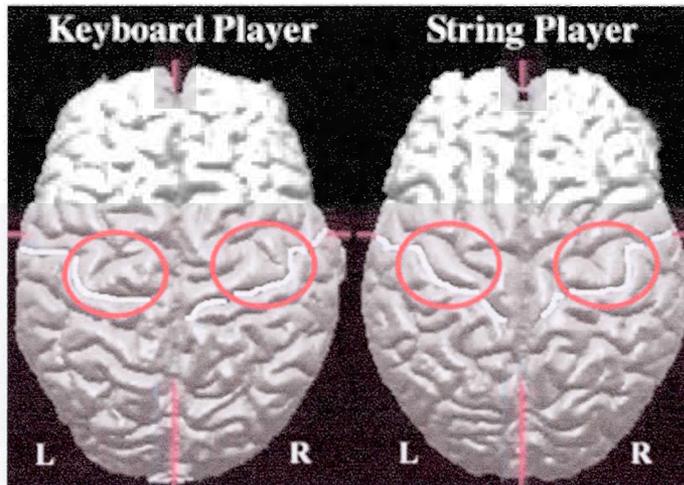


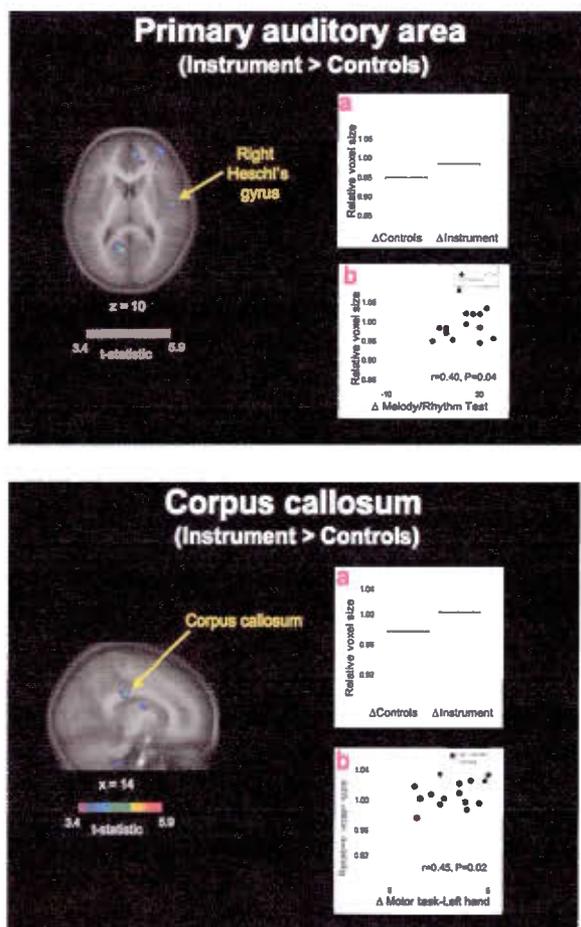
Figure 1.4 Différences anatomiques dans la région du gyrus précentral entre des musiciens adultes pianistes et violonistes (Tirée de Schlaug *et al.*, 2005)

Le volume de la matière blanche observé chez les musiciens est aussi significativement supérieur à celui observé chez les non-musiciens au niveau du corps calleux (Hyde *et al.*, 2009; Strait et Kraus, 2014), ce dernier assurant la communication interhémisphérique entre les aires sensorielles, motrices et le cortex préfrontal. Cette modification a également été observée chez les musiciens dans d'autres régions telles que l'hippocampe (Gaser et Schlaug, 2003; Pantev *et al.*, 1998), impliqué dans la mémoire à long terme.

1.2.2.2 Études chez l'enfant

Chez les enfants, les études développementales s'intéressant aux effets de la pratique musicale sont rares (Groussard *et al.*, 2010). Toutefois, des différences anatomiques ont été mises en évidence après seulement 15 mois de pratique musicale (Hyde *et al.*, 2009; Schlaug *et al.*, 2005). Par exemple, dans une étude longitudinale en IRMf chez des enfants âgés de 5 à 7 ans ($n = 31$), Hyde et ses collaborateurs (2009) n'ont relevé

aucune différence cérébrale significative entre les musiciens et les non-musiciens avant le début de l'apprentissage musical. Après quinze mois de pratique musicale, ils ont constaté une augmentation du nombre de voxels dans les régions du corps calleux (fig. 1.5a), et les régions temporales correspondant aux aires primaires auditives (fig. 1.5 b). Les résultats de l'étude de Hyde (2009) ont aussi révélé des augmentations d'activation significatives dans les régions temporales et pariéto-temporales des deux hémisphères lorsque les enfants devaient réaliser des tâches de discrimination mélodiques et rythmiques.



Figures 1.5a et 1.5b Augmentations du nombre de voxels des enfants-musiciens après 15 mois d'entraînement musical (Tirées de Hyde *et al.*, 2009)

Ces évidences corroborent les résultats d'une étude transversale de Schlaug et ses collaborateurs (2005) en neuroimagerie. Cette étude a démontré, chez des enfants âgés de 9 à 11 ans s'exerçant sur un instrument depuis 4 ans, un plus grand volume de substance grise dans les régions sensorimotrices et occipitales ainsi qu'une augmentation d'activation dans l'aire auditive primaire droite (gyrus de Heschl) et dans les régions frontales inférieures et médianes. Dans cette même étude, chez des enfants âgés de 5 à 7 ans ayant suivi un entraînement instrumental de seulement 14 mois, les chercheurs ont remarqué une amélioration sur des tests de discrimination mélodique et rythmique. Les données de ces deux études chez l'enfant (Hyde *et al.*, 2009; Schlaug *et al.*, 2005) suggèrent que la durée d'apprentissage instrumental minimale pour générer des effets tant anatomiques que fonctionnels serait d'au moins 15 mois. Elles supportent aussi l'hypothèse que les différences anatomiques observées entre les musiciens et les non-musiciens adultes sont probablement le fruit d'un entraînement musical intense débutant dès l'enfance.

À la lumière des articles cités précédemment, nous sommes en lieu de penser qu'une certaine plasticité s'installe tout au long du processus d'apprentissage d'un instrument de musique. Une expérience musicale initiée à l'enfance contribue à des effets significatifs sur la plasticité synaptique (Strait et Kraus, 2014). Cette plasticité synaptique décroît avec l'âge, mais peut être augmentée par des expériences sensorielles riches telles que la pratique d'un instrument de musique (Hyde *et al.*, 2009).

1.2.3 Pratique musicale et modifications fonctionnelles

La pratique d'un instrument de musique requiert la coordination de multiples fonctions cérébrales : la vision pour la lecture de partitions, la planification de l'action motrice pour la maîtrise du jeu sur l'instrument et l'intégration d'une

rétroaction multimodale d'ordre proprioceptif et auditif pour effectuer les ajustements moteurs sur le plan de la justesse, du doigté et de l'intensité. De plus, la pratique musicale requiert les différents processus attentionnels (Habibi *et al.*, 2017) et mnésiques ainsi que d'autres fonctions telles que les ressources mobilisées par le réseau émotionnel (Damasio, 1994). D'une façon plus globale, on peut dire qu'elle exige la symphonie de toute une organisation complexe des fonctions cérébrales sensorielles, émotionnelles, motrices et cognitives. Par conséquent, la mise en action des différentes aires cérébrales de façon simultanée augmenterait la connectivité entre les différentes zones et les deux hémisphères (Habib et Commeiras, 2014).

Chez l'adulte, des différences perceptuelles auditives ont été observées entre les musiciens et les non-musiciens. En effet, les musiciens disposeraient d'une meilleure discrimination de la parole dans le bruit (Barrett *et al.*, 2013; Hyde *et al.*, 2009; Moreno *et al.*, 2009; Schulze et Koelsch, 2012; Strait et Kraus, 2014), ainsi que d'une meilleure discrimination des variations de la hauteur des sons et des contours mélodiques (Kraus *et al.*, 2012; Moreno *et al.*, 2009). De plus, les habiletés musicales seraient corrélées avec une plus grande capacité de discrimination phonologique dans l'apprentissage d'une langue seconde (Barrett *et al.*, 2013; Moreno *et al.*, 2015; Slevc et Miyake, 2006).

Skoe et Kraus (2012), dans une étude transversale chez des adultes ($n = 45$), ont relevé des réponses sous-corticales auditives corrélées avec le nombre d'années de pratique musicale (fig.1.6). Cette recherche en électrophysiologie a étudié trois groupes de 15 participants âgés de 18 à 31 ans répartis selon le nombre d'années d'études instrumentales : 0, 1-5 et 6-11 ans. La tâche consistait à écouter passivement des stimuli auditifs de différentes fréquences. Des changements dans le système nerveux étaient observés après un an d'entraînement instrumental, devenaient stables après un minimum de 3 ans d'entraînement et persistaient à l'âge adulte même au bout de sept années d'arrêt de la pratique. La pratique musicale durant le

développement de l'enfant aurait donc des effets positifs durables sur le cerveau jusqu'à l'âge adulte.

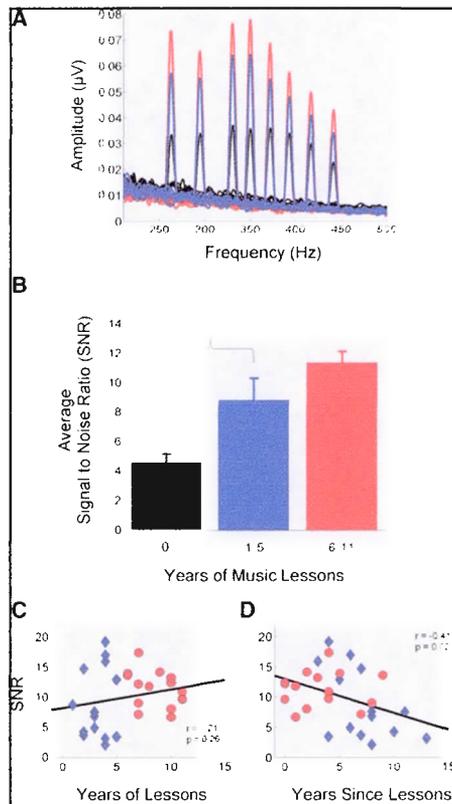


Figure 1.6 Association de la pratique musicale durant l'enfance avec les réponses neuronales aux stimuli auditifs chez l'adulte (Tirée de Skoe et Kraus, 2012)

Sur le plan moteur, plusieurs études établissent la relation entre les fonctions motrices entraînées des musiciens et le transfert de ces compétences sur des tâches non musicales. Par exemple, les musiciens présentent une asymétrie bimanuelle moins marquée que chez les non-musiciens droitiers, des performances accrues en reproduction rythmique avec les doigts, une meilleure tonicité et une meilleure posture corporelle (pour une revue, voir Moussard *et al.*, 2012).

Outre ces fonctions sensorielles et motrices, plusieurs auteurs ont remarqué chez les musiciens des capacités accrues en ce qui a trait aux fonctions exécutives définies comme étant les mécanismes de contrôle conscients de la pensée ou l'ensemble des capacités cognitives nécessaires à la planification et la réalisation d'une action dirigée vers un but (Fournieret, 2017; Luria, 1978). Ces fonctions exécutives regroupent l'inhibition, la mémoire de travail, la planification, la flexibilité, la concentration, l'attention sélective, la prise de décision et la conscience de soi. Plusieurs hypothèses sont avancées selon lesquelles la musique améliorerait ces processus en général (Barrett *et al.*, 2013; Benassi-Werke *et al.*, 2012; Groussard *et al.*, 2010; Kraus *et al.*, 2012; Moussard *et al.*, 2012; Platel, 2010; Schulze et Koelsch, 2012; Strait et Kraus, 2014). Par exemple, Kraus, Strait et leurs collègues (2012; 2015), dans leurs travaux chez l'enfant d'âge scolaire, ont constaté de nombreux effets positifs de la pratique musicale sur l'attention sélective et la mémoire de travail auditive. L'une de leurs recherches chez des enfants de 7 à 13 ans ($n = 31$) effectuant des tâches de discrimination auditive, d'attention et de rappel avec interférences faisant appel à la mémoire de travail auditive et visuelle a révélé de meilleures performances chez les musiciens comparativement aux non-musiciens (Strait *et al.*, 2012) (fig.1.7). Une autre de leurs études récentes chez l'enfant et l'adulte ($n = 78$; âge = 3-35 ans) a démontré des effets positifs de l'apprentissage de la musique avec une durée de pratique musicale de 12 mois sur le développement des mécanismes neuronaux de l'attention auditive sélective. Une des variables mesurées était la variabilité des réponses auditives évoquées au niveau du cortex préfrontal mesurées en électroencéphalographie (Strait *et al.*, 2015). La tâche consistait à diriger son attention vers de courtes histoires racontées par une voix d'homme et une voix de femme et diffusées dans deux haut-parleurs et sur deux écrans situés à gauche et à droite du participant. Les résultats ont montré moins de variabilité dans les réponses auditives évoquées dans les régions frontales droites et gauches chez les enfants d'âge scolaire et les adultes musiciens que chez leurs pairs non musiciens.

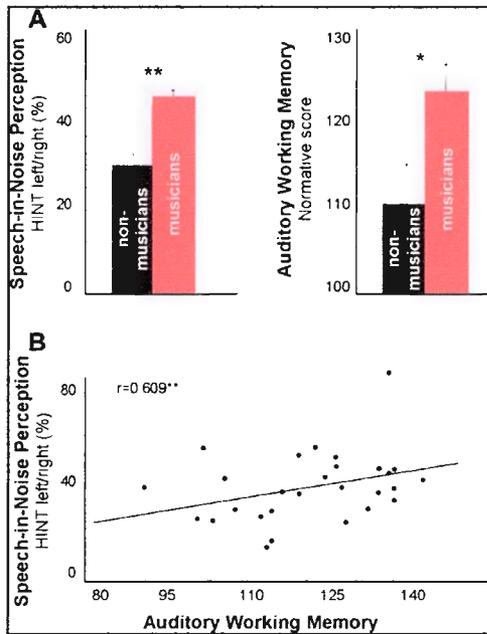


Figure 1.7 Différences perceptuelles et mnésiques entre enfants musiciens et non musiciens (Tirée de Strait *et al.*, 2012)

La pratique musicale a donc des effets significatifs tant sur les plans anatomiques que fonctionnels. Comme la présente étude s'intéresse particulièrement aux effets sur la mémoire, nous verrons dans la prochaine section comment se développent les facultés mnésiques en réponse à la pratique musicale.

1.3 Pratique instrumentale : effets sur la mémoire

1.3.1 Effets mnésiques généraux

Apprendre un instrument de musique exerce de façon fréquente et répétée les capacités mnésiques à court et à long terme. Dans cette section, nous décrirons plus spécifiquement les effets de la musique sur la mémoire motrice, verbale et visuelle. Mais d'abord, signalons qu'il existe des conditions qui favorisent la mémorisation.

En effet, la mémoire est tributaire des mécanismes supportant l'attention, les émotions et la motivation (DesPins, 1996) ainsi que des connaissances acquises. De plus, selon D'Allessandro (2010), pour qu'un stimulus auditif soit perçu par un auditeur, il ne suffit pas de tenir compte de l'attention de l'individu, mais aussi de sa compétence et de son acculturation. En matière de perception, ce n'est pas le signal seul qui détermine le type de stimulus, qu'il soit musique, langage ou bruit, mais bien une relation de familiarité entre le signal et le sujet. Par exemple, entendre parler une langue étrangère ou écouter un discours spécialisé dans un domaine qui ne nous est pas familier peut être perçu comme du bruit si l'auditeur n'a pas la compétence requise pour analyser ce qu'il entend.

Par ailleurs, la musique étant un véhicule privilégié pour les émotions (Deutsch, 2013), elle offre également la possibilité de développer des habiletés de mémorisation étonnantes et durables. Les recherches de Brosch et al. (2010) ont bien démontré que les émotions augmentent la perception des stimuli émotionnels, car elles facilitent l'accès des stimuli à la conscience dans des situations où les ressources attentionnelles sont limitées. De plus, selon la théorie des marqueurs somatiques de Damasio (1994), lorsqu'un individu est placé dans une situation d'apprentissage, il fait appel à l'ensemble de ses fonctions exécutives qui vont l'aider à s'adapter consciemment à cette situation nouvelle. Les processus de raisonnement impliqués ne sont pas que purement analytiques. Ils sont soutenus par un cadre de référence qui comprend les composantes affectives et émotionnelles vécues de nos expériences passées. C'est ainsi que l'on est plus enclin à apprendre quelque chose qui nous plaît qu'une autre qui nous laisse de marbre. Enfin, l'auditeur animé par l'émotion, par exemple réaliser un nouvel apprentissage significatif pour l'individu, aura réuni les conditions propices à l'encodage mnésique.

Quand les conditions sont favorables, la pratique musicale favorise l'encodage en différentes formes de mémoire. Lorsqu'un violoniste s'apprête à exécuter une pièce en concert, son corps et son attention sont dirigés vers les mouvements qu'il doit

accomplir, exigeant une grande précision spatiale et temporelle. Une telle maîtrise acquise par une pratique musicale fréquente et répétée contribuerait à accroître les capacités de la mémoire motrice dans les régions dédiées à la planification, la programmation et l'exécution motrice pour un contrôle précis et discipliné des mouvements fins (Moussard *et al.*, 2012; Strait *et al.*, 2014).

D'autre part, plusieurs auteurs se sont intéressés au transfert de l'expertise musicale vers d'autres domaines, comme la mémoire verbale (Besson *et al.*, 2011; Gromko *et al.*, 2009; Patel, 2011; Schulze et Koelsch, 2012). Par exemple, certains auteurs ont constaté les effets positifs de la pratique musicale dans l'apprentissage d'une langue seconde (Slevc et Miyake, 2006; Strait et Kraus, 2014; Strait *et al.*, 2013). En effet, les musiciens disposant d'une plus grande capacité à discriminer auditivement et à prononcer les sons nouveaux d'une langue étrangère auraient plus de facilité à encoder le vocabulaire propre à une langue étrangère. Selon Slevc et Miyake (2006), l'association de la musique avec des paroles dans le chant favoriserait aussi le passage des mots de la mémoire de travail à la mémoire à long terme, entre autres par la structure rythmique de la musique permettant le découpage du texte en unités pertinentes. Un groupe de mots serait plus facile à segmenter lorsqu'il est chanté plutôt que parlé, si la prosodie est cohérente avec l'organisation de la structure harmonique et la mélodie. Toutefois, malgré les données récentes en imagerie indiquant un recouvrement significatif des aires d'activation entre la musique et le langage (Moussard *et al.*, 2012), la question est de savoir s'il existe ou non un système neuronal distinct pour le chant et la parole.

Selon l'hypothèse OPERA de Patel (2011)¹, la pratique musicale permettrait un transfert mnésique vers des habiletés langagières grâce à un entraînement répété exigeant des habiletés complexes, un traitement auditif commun entre musique et langage et l'engagement attentionnel et émotionnel que cet apprentissage oblige.

¹ OPERA: **Overlap** (structures neuronales partagées entre musique et langage), **Précision** (la pratique

Somme toute, les performances cognitives significativement supérieures chez les musiciens en terme de mémoire verbale démentent les croyances qui suggèrent que l'avantage mnésique des musiciens se réduit à la mémoire auditive (Ho *et al.*, 2003; Moreno *et al.*, 2009).

Si plusieurs études indiquent que la pratique d'un instrument de musique améliore la mémoire motrice et verbale, d'autres recherches ont observé des effets négligeables concernant la mémoire visuelle. En effet, dans l'étude citée précédemment chez l'enfant et l'adulte de Strait *et al.* (2014), les performances en mémoire de travail visuelle des musiciens n'ont pas été corrélées avec la pratique musicale. De plus, dans une étude sur le rappel actif visuel, Simard et Cadoret (sous presse, 2015) ont observé que 15 enfants violonistes avaient un taux de réussite équivalent à 13 enfants non musiciens âgés de 7 à 11 ans. Ces résultats suggèrent que la pratique musicale n'influencerait pas directement le développement du rappel volontaire visuel.

Sur le plan de la mémoire à long terme, des musiciens adultes ($n = 40$; durée de la pratique musicale = 11-18 ans) effectuant une tâche mnésique auditive de familiarité sémantique à l'écoute d'une mélodie montrent aussi plus d'activation dans la partie antérieure gauche de l'hippocampe, mais aussi plus d'activation bilatérale dans les régions temporales supérieures et le cortex cingulaire médian que leurs pairs non musiciens (Groussard *et al.*, 2010). Les musiciens n'ayant pas l'oreille absolue² présenteraient aussi plus d'activation que les musiciens avec l'oreille absolue au niveau du cortex préfrontal, signe d'un effort d'analyse supplémentaire (Groussard *et al.*, 2010; Platel, 2010).

² L'oreille absolue est la capacité d'identifier une ou plusieurs notes sans l'aide d'aucune référence tonale ou de reconnaître la tonalité originale d'une mélodie connue. (Kraus *et al.*, 2014; Parbery-Clark *et al.*, 2013; Schellenberg et Trehub, 2003; Zatorre, 2003).

1.3.2 Effets mnésiques auditifs chez l'adulte

Les recherches montrent que les musiciens adultes ont une meilleure oreille relative que leurs pairs non musiciens et ils détectent de plus petites variations de fréquence de notes individuelles dans une mélodie familière (Bergman Nutley *et al.*, 2014). La comparaison analytique d'une variation mélodique avec son contour mélodique original sollicite activement les mécanismes de mémoire. En effet, pour comparer une séquence de sons avec une autre, il faut maintenir ces informations en mémoire, les comparer puis isoler l'élément qui diffère. En répétant son instrument, un musicien manipule constamment en mémoire des séquences de notes, des séries de mouvements à effectuer et corrige son jeu selon ce qu'il souhaite entendre. D'autres études soulignent que les musiciens adultes ont de meilleures performances que les non-musiciens aux tests de rappel de hauteur et de timbre (Schellenberg et Trehub, 2003) ainsi qu'aux tâches de rappel exigeant la priorisation d'items (Benassi-Werke *et al.*, 2012; Schulze et Tillmann, 2013).

Est-ce que ces mêmes bénéfiques mnésiques auditifs pourraient être observés chez l'enfant? Des différences ont d'ailleurs été démontrées entre les adultes et les enfants suggérant des résultats différents sur une tâche de rappel actif visuel chez l'enfant, comparativement à l'adulte (Dionne et Cadoret, 2013). Nous aborderons dans la prochaine section les effets développementaux de la pratique musicale sur la mémoire auditive. Mais afin de mieux comprendre ces effets, il convient auparavant de dresser brièvement le portrait développemental de la perception auditive.

1.4 Pratique musicale : effets sur le développement de la mémoire auditive

1.4.1 Développement de la perception auditive

Les habiletés perceptuelles auditives arrivent à maturité lentement et de façon inégale selon les différentes composantes du son, que sont la fréquence, l'intensité, la durée et le timbre. Selon la revue de Sanes et Woolley (2011), la maturité auditive chez l'enfant est atteinte vers l'âge de dix ans. Ce développement des capacités perceptives peut être influencé par les expériences de l'enfant. Selon une étude longitudinale de Moreno (2009) en électroencéphalographie, une augmentation des capacités de discrimination auditive peut être observée chez l'enfant ($n = 32$, âge moyen = 8 ans) après une aussi courte période que 6 mois d'entraînement musical en groupe.

En ce qui concerne la perception de la fréquence, le développement de cette capacité poursuit une lente maturation qui s'étend jusqu'à l'âge de 10 ans (Sanes et Woolley, 2011). Il est établi que la sensibilité du système auditif humain est en relation directe avec la perception du langage. Comme l'enfant perçoit en premier les basses fréquences correspondant aux voyelles de la voix parlée (entre 45 Hz et 750 Hz), l'enfant se met d'abord à expérimenter ces fréquences vocalement, produisant des sons voisés (Lécuyer *et al.*, 1994). Cependant, des recherches ont démontré que des bébés âgés de quelques jours seulement pouvaient percevoir la différence entre les consonnes « b » et « p » (Daviault, 2011; Eimas *et al.*, 1971). Dans les années 1970, de nombreux travaux ont démontré que des bébés âgés de 2 semaines à 2 mois pouvaient discriminer tous les sons des langues parlées autour d'eux. Ces découvertes sont d'autant plus étonnantes qu'elles ne sont pas dues au résultat d'un apprentissage. Dès ses premiers jours de vie, l'être humain serait donc équipé pour apprendre toutes les langues du monde. Cependant, vers 10 à 12 mois, cette capacité innée semble disparaître au profit d'une meilleure discrimination des langues parlées autour de lui

(Daviault, 2011). En effet, déjà vers l'âge de 7-8 mois l'enfant commence à produire vocalement des hautes fréquences correspondant aux consonnes (entre 2000 Hz et 5000 Hz) qui sont propres à sa langue maternelle et se met à babiller. L'enfant commence à produire ces hautes fréquences lorsqu'il les discrimine. Toutefois, malgré le fait que l'enfant discrimine d'abord les fréquences graves, le registre grave atteindra sa pleine maturité bien après celui des autres fréquences (médiums, hautes), soit vers l'âge de 10 ans (Sanes et Woolley, 2011). Cette lente maturation pourrait être expliquée par le fait que les sons de basses fréquences, en se transmettant dans la cochlée, font vibrer les cellules ciliées de la majorité de la surface de la membrane basilaire, de la base à l'apex. Cette propagation des basses fréquences de la base à l'apex stimule aussi les cellules correspondant aux harmoniques. Les hautes fréquences, quant à elles, n'activent qu'une partie de la membrane et n'atteignent pas l'apex, ce qui pourrait expliquer leur maturation plus rapide.

Bien qu'il soit en lien avec la perception du langage (entre 45 Hz et 5KHz), le spectre audible du système auditif humain se situe entre 20 Hz et 20 kHz. Néanmoins, une conséquence de la formation du conduit auditif humain est l'augmentation de 30 à 100 fois l'amplitude des fréquences avoisinant les 3000 Hz, fréquences relatives aux consonnes occlusives permettant de distinguer les phonèmes entre eux (Purves *et al.*, 2011, chapitre 4). Ainsi, toute perte auditive sélective entre 2000 Hz et 5000 Hz (production vocale d'harmoniques, de consonnes) dégrade sévèrement la reconnaissance de la parole.

Tout comme la perception de la fréquence, celle de l'intensité n'atteindra la maturité que vers l'âge de 10 ans. Pour distinguer une différence d'intensité entre deux sons, les enfants âgés de 0 à 3 ans requièrent un écart d'environ 6 dB. Cet écart diminue à 2 dB vers l'âge de 4 ans pour les sons d'une durée suffisante (Sanes et Woolley, 2011).

Concernant le seuil de discrimination de la durée d'un son, il passerait de 80 ms à 20 ms entre l'âge de 6 ans et l'âge adulte (Sanes et Woolley, 2011; Whitton et Polley, 2011). La période critique de développement de la perception de la durée reste à découvrir.

1.4.2 Pratique musicale et effets développementaux sur la mémoire auditive

Alors que son système auditif se développe, l'enfant musicien, par la pratique fréquente et répétée de son instrument, exerce ses capacités sensorielles et développe de nouvelles habiletés cérébrales auditives, dont la mémoire auditive. Plusieurs études ont porté sur la discrimination auditive et l'attention auditive sélective des enfants-musiciens, mais peu d'études ont exploré leur mémoire auditive. À notre connaissance, une seule étude a exploré les effets de la pratique musicale sur la mémoire auditive des enfants-musiciens (Strait *et al.*, 2012).

Strait *et al.* (2012) ont relevé de meilleures performances chez les enfants-musiciens ($n = 15$; durée de l'entraînement ≥ 4 ans) que chez leurs pairs non musiciens ($n = 16$) sur une tâche de rappel avec interférences. Dans cette tâche de rétention mnésique, les enfants entendaient une série de mots simples entremêlés de chiffres et devaient répéter verbalement d'abord les mots puis les chiffres, dans l'ordre entendu. L'étude a révélé que les musiciens avaient une performance de mémoire de travail auditive supérieure à celle des non-musiciens (voir fig. 1.7, p.20).

Toutefois, les rares travaux effectués jusqu'à ce jour sur la mémoire de travail ont considéré cette dernière comme une seule entité. Or, la mémoire de travail comprend à la fois les processus de stockage de l'information et ceux de manipulation (Baddeley, 2012). Pour mesurer pleinement les effets de la pratique musicale sur la mémoire de travail auditive, il est important de considérer ces deux aspects qui ne

reposent pas forcément sur les mêmes réseaux neuronaux. L'objectif de cette étude est d'examiner plus particulièrement les effets de la pratique musicale chez l'enfant, sur un de ces processus de manipulation en mémoire de travail qui est le rappel actif auditif, soit la capacité d'isoler en mémoire une information particulière dans un contexte ambigu. L'intérêt de considérer cette fonction "de manipulation" en particulier est qu'elle cible une opération mentale que les enfants musiciens utilisent beaucoup dans leur pratique. Par ailleurs, les substrats neurologiques de cette fonction ont été identifiés chez l'adulte, ce qui permettra de formuler des hypothèses quant aux effets neurologiques de la pratique musicale chez l'enfant pour les fonctions de la mémoire.

1.4.3. Pertinence de la recherche

Tel que mentionné précédemment, le rappel actif sous-tend plusieurs processus à savoir la capacité de sélectionner et d'isoler en mémoire l'information requise, la capacité à maintenir en mémoire cette information pour ultérieurement la rapporter, la manipuler en mémoire. Ces processus sont indispensables à tout apprentissage, que ce soit dans un cadre scolaire ou dans la vie de tous les jours. La pertinence de cette recherche est d'examiner les avantages potentiels que peut amener l'apprentissage de la musique sur le développement du rappel actif auditif chez l'enfant. De tels changements pourraient supporter les apprentissages en classe qui se font la plupart du temps en mode auditif : établir des liens plus rapidement entre une nouvelle information entendue et les connaissances acquises et emmagasinées en mémoire afin de mieux consolider les apprentissages. Être capable d'aller récupérer de façon rapide et efficace en mémoire des informations précises qui ont été émises oralement s'avère essentiel lors de l'apprentissage en classe. Or, l'exercice d'un instrument de musique sollicite continuellement les capacités mnésiques auditives de l'enfant.

Cette recherche est également pertinente car elle vise à tester l'hypothèse que certaines composantes de la mémoire de travail chez les enfants pourraient être améliorées ou soutenues au cours du développement. Enfin, cette recherche est pertinente car elle examine le potentiel incroyable que peut avoir l'expérience musicale chez les enfants. Alors que les cours de musique ont tendance à disparaître dans certaines commissions scolaires, cette recherche est d'autant plus importante pour faire valoir l'importance cruciale de la musique dans le développement cognitif de l'enfant.

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE

2.1 Objectifs

L'objectif principal de cette étude expérimentale visait à mesurer les effets de la pratique du violon ou du violoncelle chez l'enfant âgé de 7 à 11 ans sur le rappel actif auditif. Les stimuli choisis pour la tâche de rappel actif étaient à la fois tonaux et verbaux et variaient sur des composantes de fréquence et de durée de stimuli. Les effets de la pratique musicale ont été évalués en mesurant les performances des participants sur des essais de rappel et des essais contrôles. L'objectif de cette étude visait également à mesurer l'activité cérébrale associée au rappel actif auditif à l'aide de l'électroencéphalographie (EEG).

2.1.1 Questions de recherche

Dans cette recherche, les questions que nous avons posées étaient :

- 1) La pratique du violon ou du violoncelle améliore-t-elle les taux de réussite sur une tâche de rappel actif auditif chez l'enfant âgé de 7 à 11 ans?
- 2) La pratique du violon ou du violoncelle améliore-t-elle les temps de réaction sur une tâche de rappel actif auditif chez l'enfant âgé de 7 à 11 ans?
- 3) La pratique du violon influence-t-elle l'activité cérébrale associée au rappel actif auditif de l'enfant?

2.1.2 Hypothèses

Les hypothèses de recherche sont les suivantes:

- 1) Les enfants musiciens âgés de 7 à 11 ans ont un taux de réussite supérieur dans le rappel actif auditif à celui des enfants non musiciens.
- 2) Les enfants musiciens âgés de 7 à 11 ans sont plus rapides pour rapporter leurs réponses dans le rappel actif auditif que les enfants non musiciens.
- 3) Cette différence de réussite et de temps de réaction entre musiciens et non-musiciens est accompagnée d'une différence au niveau des potentiels cérébraux reliés au rappel actif.

2.2 Sélection des participants

2.2.1 Critères d'inclusion

Dans cette étude, les participants étaient 40 enfants âgés de 7 à 11 ans. Cet intervalle d'âge a été choisi parce qu'à cet âge les enfants sont capables d'effectuer une tâche de rappel actif (Dionne et Cadoret, 2013), et peuvent répondre aux contraintes de la longueur de la tâche en électrophysiologie. En effet, des expériences antérieures ont démontré que les enfants plus jeunes que 7 ans ont de la difficulté à réaliser la grande quantité d'essais nécessaires pour ce type de protocole. Tous les enfants savaient bien parler et comprendre le français puisque les explications de la tâche et les tests comportementaux ont été faits dans cette langue. Tous les enfants avaient un seuil de conduction auditive mesuré bilatéralement de ≤ 20 dBHL pour les bandes de fréquences situées entre 500 Hz et 4000 Hz (Strait *et al.*, 2015). Le test Gordon's

Primary Measure of Music Audiation³ (1979, 1986) a été effectué par tous les participants pour vérifier leur capacité à discriminer la différence entre deux fréquences ou deux durées.

Les quarante participants âgés de 7 à 11 ans étaient répartis en deux groupes : 20 enfants musiciens (âgés de 8,1 ans à 11,6 ans; âge moyen: 10,0 ans; 16 filles) et 20 enfants non musiciens (âgés de 7,5 ans à 11,7 ans; âge moyen: 9,5 ans; 11 filles). Au moment de la collecte de données, les enfants faisant partie du groupe expérimental (musiciens) avaient reçu des leçons privées hebdomadaires de violon ou violoncelle (ratio : 1 enseignant/1 élève) depuis au moins 14 mois. Ils exerçaient une pratique constante de leur instrument au moins 3 fois par semaine durant au moins 20 minutes chaque séance et ce, jusqu'au début de la collecte de données (Parbery-Clark *et al.*, 2013; Strait *et al.*, 2014; Strait *et al.*, 2015).

Le groupe contrôle était composé d'enfants non musiciens ne suivant pas de leçons privées, mais pouvant avoir reçu des cours de musique en groupe à raison d'un maximum d'une heure par semaine sans entraînement quotidien supplémentaire (Bailey *et al.*, 2014), tel que des cours réguliers d'éducation musicale au primaire.

2.2.2 Critères d'exclusion

Les enfants gauchers ont été exclus de la présente étude afin d'avoir un échantillon homogène en termes de latéralité. La dominance manuelle a été évaluée par le test de latéralité d'Auzias (1984). Les enfants ne pouvant pas discriminer les couleurs rouge et vert des boutons de réponses ont été exclus. Les participants ne devaient pas avoir reçu de diagnostics de déficiences neurologiques (ce qui éliminait les difficultés d'inhibition), ne pas avoir de handicaps visuel, moteur ou auditif, ne pas être porteurs

³ Nous désignerons le *Gordon's Primary Measure of Music Audiation* par l'abréviation *Gordon's PAMA* pour alléger la suite du texte.

d'implants métalliques ou cochléaires à la suite d'une intervention chirurgicale, ni prendre des médicaments qui auraient pu nuire à leurs performances ou à la réalisation de la tâche. Nous avons dû aussi exclure les enfants possédant l'oreille absolue, car cela aurait pu créer des écarts de performances considérables. L'oreille absolue est la faculté de nommer ou produire des sons isolés en l'absence de contexte ou de référence fréquentielle. Entre 4 % et 40 % des musiciens ayant commencé la musique avant l'âge de 7 ans posséderaient l'oreille absolue; il était donc possible, mais peu probable d'avoir à considérer cette variable (Bailey *et al.*, 2014; Parbery-Clark *et al.*, 2013; Steele *et al.*, 2013). Un test d'oreille absolue, qui mesure la capacité à identifier ou reproduire une note entendue sans contexte a été effectué (Zatorre, 2003). (Pour le questionnaire aux parents, voir annexe A).

2.2.3 Considérations éthiques

Un prospectus a été envoyé aux parents afin de leur expliquer la nature de l'expérimentation, les risques minimaux et les inconvénients. Lors de la première rencontre, un formulaire de consentement a été rempli et signé (voir annexe B). Il était expliqué aux enfants et à leurs parents que l'utilisation de l'électroencéphalogramme ne présente aucun risque pour l'enfant, mais occasionne le désagrément du gel dans les cheveux qui s'enlève aisément avec un shampoing. Les participants ont reçu une carte-cadeau d'une valeur de 50 \$ pour leur contribution à l'étude. La présente étude a été approuvée par le comité d'éthique de la recherche pour les projets d'étudiants de l'Université du Québec à Montréal. Le certificat de réussite EPTC 2 : FER a été obtenu par l'étudiante-chercheuse en mars 2015 et se trouve en annexe B.

2.2.4 Caractéristiques des participants

La différence entre les moyennes d'âge des deux groupes (mus = 10,04 ans; non-mus = 9,46 ans) n'était pas significative selon un test t ($p=0,18$). Les enfants musiciens avaient un niveau moyen d'expérience sur leur instrument de 39,10 mois, soit un peu plus de 3 ans, qui variait de 20 à 70 mois. L'acculturation musicale⁴ fut quantifiée en calculant le nombre de personnes vivant sous le même toit que l'enfant musicien incluant lui-même (mus=1,76; non-mus=0,45; SD=1,10). Chez les musiciens ($n=20$), il y avait 16 filles musiciennes et chez les non-musiciens ($n=20$), il y avait 11 filles non-musiciennes.

Le niveau d'éducation des parents a été établi selon une échelle en 6 points : (1) deux parents de niveau secondaire; (2) un parent de niveau secondaire et un parent de niveau collégial; (3) deux parents de niveau collégial; (4) un parent de niveau universitaire et un parent de niveau secondaire; (5) un parent de niveau collégial et un parent de niveau universitaire; (6) deux parents de niveau universitaire. La moyenne du niveau d'éducation des parents fut calculée (mus : 5,70; moy non-mus 5,55). Dans cette perspective, nous n'avons pas trouvé de différence significative selon un test t entre les niveaux d'éducation des parents des deux groupes ($p = 0,71$).

2.3 Design expérimental

La présente étude transversale a comparé un groupe d'enfants musiciens violonistes ou violoncellistes et un groupe d'enfants non musiciens sur une tâche de rappel actif auditif.

⁴ L'acculturation musical est le degré de culture musicale du milieu où vit l'enfant.

2.3.1 Contrôle des variables

Les variables indépendantes étaient : le sexe, l'âge de l'enfant (au moment de la collecte de données) ainsi que l'âge au début de son apprentissage instrumental, la constance des répétitions jusqu'au début de l'étude, le nombre de mois d'études d'apprentissage instrumental, le suivi ou non d'un cours de théorie musicale, l'acculturation musicale et le niveau de scolarité des parents des participants. L'acculturation musicale, c'est-à-dire le degré de culture musicale du milieu, a été évaluée pour chaque enfant à partir d'un questionnaire (voir annexe A). Ces mesures étaient importantes à considérer puisque le fait d'entendre de la musique comme le fait qu'un membre de sa famille joue d'un instrument de musique pourrait contribuer à développer les habiletés auditives de l'enfant et ainsi expliquer certains effets. Il a été vérifié aussi si les enfants musiciens recevaient ou non des cours de théorie musicale hebdomadaires en plus de leur cours d'instrument. Le fait de suivre de tels cours supplémentaires ayant pour objectif d'accroître les capacités discriminatoires auditives pourrait avoir des effets significatifs sur les performances de l'enfant.

Les deux indicateurs de performance du rappel actif sont le taux de réussite et les temps de réaction au moment de la réponse motrice (Cadoret et Petrides, 2007). C'est la raison pour laquelle les variables dépendantes de cette étude étaient le pourcentage de réussite ainsi que le temps de réaction des enfants lors des essais de rappel et les essais contrôles. En ce qui concerne l'EEG, les variables dépendantes étaient l'amplitude et la latence des potentiels évoqués.

Des quatre composantes sonores, nous avons contrôlé le timbre (même voix de femme) et l'intensité (sons émis à 70 dBHL) et avons fait varier la fréquence des stimuli de 200 Hz à 300 Hz et la durée des stimuli de 250 ms à 2500 ms.

2.3.2 Questionnaires préexpérimentaux

Un questionnaire a été rempli par un des parents de chaque enfant pour contrôler les variables nommées au point précédent et répondre à des questions concernant l'état physiologique de son enfant, par exemple tout problème neurologique, de santé, handicap visuel, auditif ou moteur pouvant nuire à la réalisation de la tâche ou pouvant influencer les données (voir annexe A).

2.3.3 Tests comportementaux

Afin d'avoir une mesure globale comparative de la mémoire de travail des enfants, deux mesures de la mémoire de travail ont été recueillies pour chaque enfant à partir des sous-tests *Digit Span* et *séquence lettres et chiffres* de l'échelle d'Intelligence de Weschler pour enfants (WISC-IV, 4^e édition, version francophone du Canada, 2005). Ce test a été sélectionné, car il est conçu pour les enfants âgés de 6 à 16 ans. Weschler (2005) rapporte d'excellents coefficients de cohérence interne ($\alpha = 0,80$ à $0,90$) ainsi que de très bons coefficients de stabilité temporelle ($r = 0,80$ à $0,90$) pour les scores mesurés. La tâche consistait à rappeler des séries de chiffres ou des séries de lettres et chiffres énumérés oralement par l'examineur dans l'ordre direct ou dans l'ordre inverse.

Par la suite, les participants ont passé un test d'audition afin de vérifier leur seuil de perception auditive. Chaque participant devait avoir un seuil conducteur d'au moins ≤ 20 dB HL sur quatre bandes de fréquences : 500 dB, 1000 dB, 2000 dB et 4000 dB mesuré bilatéralement avec un audiomètre⁵, tel que recommandé en audiologie.

⁵ Modèle: Audiomètre de marque Grason-Stadler, modèle GSI-17.

Afin de vérifier et mesurer les capacités des participants à discriminer auditivement entre deux rythmes (durées) ou deux tons (hauteurs), ils ont été soumis au test *Gordon's Primary Measure of Music Audiation (K-Grade 3)* (Habibi *et al.*, 2014; Schlaug *et al.*, 2005). Dans ce test largement utilisé en recherche, l'enfant entendait 40 paires de rythmes et 40 paires de séquences tonales (sons purs) et devait dire si les paires étaient identiques ou différentes.

2.3.4 Tâche de rappel actif auditif

Le principe de la tâche utilisée dans le rappel actif auditif consistait à présenter d'abord à l'enfant un stimulus sonore qui comportait deux caractéristiques, soit une certaine fréquence et une certaine durée (période d'encodage). Après un délai de 1000 millisecondes (ms), un indice visuel demandait à l'enfant de se rappeler soit la fréquence (une échelle), soit la durée (une horloge) de ce stimulus (période de l'indice de rappel). Après un deuxième délai de 2000 ms, un deuxième stimulus sonore était alors présenté (période test)⁶ et l'enfant devait décider, en fonction de la question posée, si la durée ou la fréquence du deuxième son correspondait à la durée ou la fréquence du premier son qui avait été mémorisé (fig.2.1). S'il y avait correspondance, l'enfant devait appuyer sur le bouton vert du clavier de réponse et s'il n'y avait pas de correspondance, il devait appuyer sur le bouton rouge. L'enfant devait donner sa réponse en appuyant sur un bouton avec la main droite seulement. La représentation neuronale de la main gauche chez le violoniste et le violoncelliste étant plus marquée, la sélection de la main dominante des enfants pour effectuer la réponse motrice ne donnait d'avantage moteur à aucun des deux groupes.

⁶ La mémoire échoïque, qui a une durée variant entre 250ms et 4 secondes, n'avait plus d'effet au moment de la période test (Darwin *et al.*, 1972).

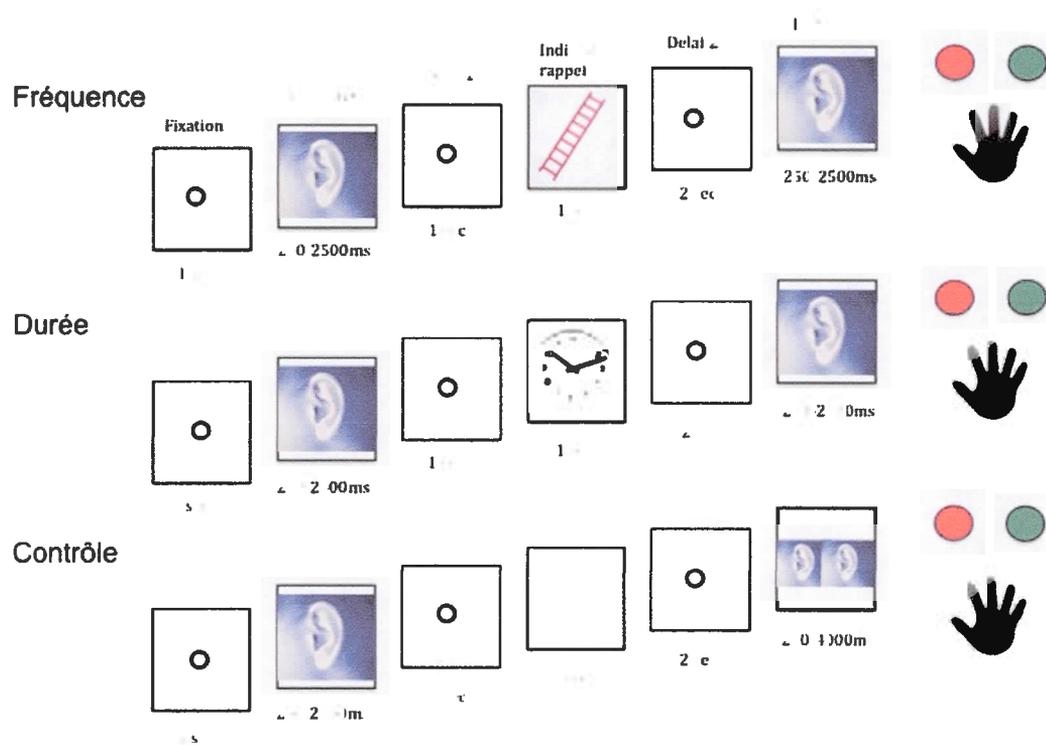


Figure 2.1 Tâche de rappel actif auditif

Il est important de noter qu'au moment du son test, les 2 caractéristiques du son (fréquence et durée) pouvaient être identiques ou différentes de celles du son mémorisé préalablement (type A). Dans d'autres cas, une seule caractéristique pouvait être similaire ou différente (type B).

La tâche de rappel comprenait des essais contrôles. Dans ces essais, un stimulus sonore était également présenté à l'enfant au moment de l'encodage. Toutefois, l'indice visuel, qui était un cercle gris, ne demandait pas à l'enfant de se rappeler une information particulière, mais d'attendre la phase test au cours de laquelle 2 stimuli sonores étaient présentés en séquence et l'enfant devait décider si les sons étaient identiques ou non selon leur durée et leur fréquence. Si les sons étaient identiques, l'enfant appuyait sur le bouton vert du clavier de réponse et s'ils ne l'étaient pas, il appuyait sur le bouton rouge, et ce, toujours avec sa main droite.

La configuration des essais contrôles a été établie pour isoler les processus de rappel des processus d'encodage, d'attention et de réponse motrice (Cadoret et Petrides, 2007). En effet, étant donné que dans la tâche les essais contrôles et expérimentaux sont présentés de façon aléatoire, jusqu'à l'indice visuel demandant le rappel ou non, les enfants ne peuvent prédire quel type d'essai ils effectuent et doivent donc encoder et mémoriser le premier son avec la même attention. Ils doivent ensuite porter la même attention à l'indice visuel pour interpréter la valeur de l'indice et appliquer la règle propre à chaque indice (rappel de la fréquence, de la durée ou aucun rappel). Au moment du son test, dans les essais de rappel et de contrôle, l'enfant doit porter le même jugement à savoir si le son test correspond au son présenté ou mémorisé et rapporter sa réponse en pressant une touche. Par conséquent, la différence principale entre les essais de rappel et les essais contrôles est que dans les essais de rappel, les enfants doivent chercher en mémoire une information particulière ce qu'ils ne font pas dans les essais contrôles.

2.3.4.1 Choix des stimuli

Les stimuli utilisés dans cette étude ont été formés de la syllabe /da/ et chantés par une voix de femme soprano. La syllabe /da/ a été sélectionnée pour le mode d'articulation de la consonne *d* qui est occlusive, constrictive et voisée (l'air en provenance des poumons est bloqué totalement pendant une fraction de seconde, mais fait tout de même vibrer les cordes vocales avant l'explosion ou la sortie de l'air). Cette consonne étant voisée, elle avait l'avantage d'inclure une rapide transition vers la voyelle *a* (Strait *et al.*, 2014). Le choix d'un stimulus verbal chanté a été justifié par le contrôle de la variable du timbre : une voix de femme, son familier pour un enfant, ne donnait d'avantage perceptuel à aucun des deux groupes. De plus, les stimuli chantés se retrouvent dans l'environnement naturel de l'enfant, au contraire des sons purs émis par un synthétiseur. Cette caractéristique usuelle des stimuli a facilité le maintien de l'attention de l'enfant au cours de l'expérimentation (Davialt, 2011).

Les différences tonales ont été incluses dans la gamme chromatique occidentale⁷ et ont varié de façon équivalente entre des intervalles tonals et atonals. Les fréquences fondamentales retenues dans notre protocole ont été choisies dans le registre moyen correspondant à la voix de la femme. Le registre moyen de la voix de la femme se situe entre 200 Hz et 300 Hz, ce qui correspond aux notes du piano situées entre Sol₃ et Ré₄, considérant le Do central du piano comme étant le Do₄ (fig. 2.2). Ces correspondances entre fréquence et notes sont obtenues en référence au A₄/La₃ à 440 Hz qui est un standard pour la calibration de l'équipement acoustique et les instruments de musique moderne. Pour chaque bloc, quatre notes ont été sélectionnées aléatoirement et équitablement dans une banque de stimuli comprenant les huit notes situées dans ce registre.

⁷ La gamme chromatique occidentale est un ensemble de 12 notes séparées par intervalles de 1/2 ton et comprises dans une octave.

59	Sol4	G5	g''	783,991
58	Fa4:	F#5 ou G>5	fis''	739,989
57	Fa4	F5	f''	698,456
56	Mi4	E5	e''	659,255
55	Ré4:	D#5 ou E>5	dis''	622,254
54	Ré4	D5	d''	587,33
53	Do4:	C#5 ou D>5	cis''	554,365
52	Do4	C5	c''	523,251
51	Si3	B4	b'	493,883
50	La3:	A#4 ou B>4	bs'	466,164
49	La3	A4	a'	440
48	Sol3:	G#4 ou A>4	gis'	415,305
47	Sol3	G4	g'	391,995
46	Fa3:	F#4 ou G>4	fis'	369,994
45	Fa3	F4	f'	349,228
44	Mi3	E4	e'	329,628
43	Ré3:	D#4 ou E>4	dis'	311,127
42	Ré3	D4	d'	293,665

Figure 2.2 Correspondance entre les fréquences et les notes du piano (Abromont et De Montalembert, 2001)

Relativement à la durée, l'habileté à discriminer une différence de durée atteint sa pleine maturation entre l'âge de 6 ans et l'âge adulte, passant de 80 ms à 20 ms (Sanes et Woolley, 2011). Cependant, le seuil minimal de différence discriminatoire de durée perceptible chez l'enfant pour la localisation d'un son est d'au moins 1000 ms. Dans notre protocole, les différences de durées de nos stimuli pour chaque essai ont varié entre 1000 ms et 3000 ms. Pour chaque bloc, trois durées de stimuli pouvaient être sélectionnées : soit 250 ms/1250 ms/ 2250 ms ou 500 ms/1500 ms/ 2500 ms. Le seuil de détection perceptuel étant de 250 ms pour des enfants de cet âge (Daviault, 2011; Sanes et Woolley, 2011), toutes les fréquences ou notes ont été émises à une durée égale ou supérieure à 250 ms afin de s'assurer que les participants percevraient clairement le stimulus.

2.3.5 Plan expérimental

Un enfant non musicien s'est retiré de cette partie du protocole, soit les mesures EEG lors du rappel actif auditif. Donc, le groupe expérimental était constitué de vingt enfants violonistes ($n = 20$; 16 filles) et le groupe contrôle de dix-neuf enfants non musiciens ($n = 19$; 11 filles) âgés de 7 à 11 ans. Chaque groupe a été soumis aux mêmes tests; tous les participants ont effectué le même nombre d'essais de rappel de la fréquence, de la durée et d'essais contrôles. La tâche a été programmée à partir du logiciel E-Prime 2 (W. Schneider *et al.*, 2007).

Chaque participant a réalisé 240 essais répartis sur 5 blocs de 48 essais distribués aléatoirement. Une pause de quelques minutes entre chaque bloc permettait au participant de se détendre. Il est à noter que l'enfant pouvait prendre une pause à tout moment s'il le désirait ou mettre fin à l'expérimentation. Le tableau 2.1 expose la répartition des différents types d'essais pour une totalité de 240 essais : 5 blocs de 48 essais ont été effectués en tout, pour une totalité de 240 essais.

Tableau 2.1. Description globale de la tâche de rappel actif auditif

Rappel de durée (D)		Rappel de fréquence (F)		Contrôle (C)
Dma ^{type A}	20 essais	Fma ^{type A}	20 essais	Cma : 40 essais
Dma ^{type B}	20 essais	Fma ^{type B}	20 essais	
Dnma ^{type A}	20 essais	Fnma ^{type A}	20 essais	Cnma : 40 essais
Dnma ^{type B}	20 essais	Fnma ^{type B}	20 essais	
Total (D) :	80 essais	Total (F)	80 essais	Total : 80 essais

Légende : *m* match/identique; *nma* non-match/différent

Bien entendu, pour chaque bloc, les durées et les fréquences des notes étaient sélectionnées au hasard par l'ordinateur dans une banque de stimuli.

Conséquemment, à l'intérieur de chaque bloc de 48 essais, chaque fréquence et chaque durée ainsi que leurs combinaisons apparaissaient au hasard et en probabilité équitable faisant en sorte d'éliminer des relations stables qui auraient pu établir des liens particuliers entre des notes (fréquences) ou des durées. Toutefois, entre les blocs, un choix délibéré de fréquences de notes a été effectué afin d'éviter la familiarité de séries de notes tonales (voir tableau 2.2).

Tableau 2.2 Répartition des stimuli entre les blocs d'essais

	Bloc 1	Bloc 2	Bloc 3	Bloc 4	Bloc 5
Durées	500 ms/ 1500 ms/ 2500 ms	250 ms/ 1250 ms/ 2250 ms	500 ms/ 1500 ms/ 2500 ms	250 ms/ 1250 ms/ 2250 ms	500 ms/ 1500 ms/ 2500 ms
Fréquences					
392 Hz/Sol3	x		x		x
415 Hz/Sol#3		x		x	
440 Hz/La3		x			x
466 Hz/La#3				x	
494 Hz/Si3	x		x	x	x
523 Hz/Do4	x		x		x
554 Hz/Do#4		x	x	x	
587 Hz/Ré4	x	x			

2.4 Matériel expérimental

2.4.1 Enregistrements et diffusion des stimuli

Les stimuli étaient chantés par une voix de femme soprano, chanteuse professionnelle. La même voix a été utilisée pour tous les stimuli de façon à contrôler le paramètre sonore du timbre. Les structures auditives de petite taille telles que celles des enfants constituant de meilleurs résonateurs pour les hautes fréquences (Sanes et Woolley, 2011), une voix de femme a été sélectionnée plutôt qu'une voix d'homme. Le microphone utilisé pour les enregistrements a été un Schoeps MK4, combiné au préamplificateur API 512 C. Le logiciel d'enregistrement choisi a été Cubase et le

logiciel d'édition Wavelab, deux logiciels communément utilisés dans les studios d'enregistrement professionnels. La session d'enregistrement a été effectuée au Studio Le Hublot, à Montréal.

L'intensité de diffusion binaurale des stimuli a été contrôlée et égalisée à 70 dBHL⁸ (Kraus *et al.*, 2014; Parbery-Clark *et al.*, 2013). Basés sur des études antérieures (Purves *et al.*, 2011), les stimuli ont été émis dans des haut-parleurs situés devant le participant, de façon à stimuler binauralement le système auditif. Le choix des haut-parleurs plutôt que d'écouteurs insérés dans l'oreille visait à ce qu'aucune composante métallique près des électrodes n'interfère avec les signaux EEG enregistrés à la surface du crâne. Le bruit de fond dans la salle d'EEG ne dépassait pas 15 dBHL afin de mieux contrôler le paramètre d'intensité. Les instructions lors de la phase expérimentale ont été indiquées visuellement sur un ordinateur, de façon à capter l'attention visuelle sur un point précis et qu'aucun autre stimulus visuel ne crée d'interférence attentionnelle lors de l'écoute des stimuli auditifs.

2.4.2 Électroencéphalographie (EEG) et potentiels évoqués

L'électroencéphalographie (EEG) est une technique permettant d'enregistrer de manière continue l'activité cérébrale.

Les signaux EEG ont été acquis avec un système Active Two de BIOSEMI à 64 canaux. Ce système utilise des électrodes actives de basse impédance, ce qui permet de résoudre les problèmes d'interférence et d'artefacts associés aux câbles et aux mouvements des connecteurs. L'acquisition des signaux a été faite selon le placement standard 10-20 des électrodes de surface. Tel que recommandé, l'impédance

⁸ L'abréviation dBHL (" Decibels Hearing Level ") est calculé, pour chaque fréquence, par rapport à la médiane des seuils auditifs d'une population normale (Guérit, 1998). Le dBHL est aujourd'hui utilisé de façon standard en audiologie.

individuelle de chaque électrode était inférieure à 5 k Ω (Guérit, 1998). L'amplification du signal a été réalisée par des amplificateurs référentiels : une électrode active et une électrode de référence, reliées à une unité d'amplification, chacune d'elles agissant avec un gain identique. Les signaux ont été acquis à une fréquence d'échantillonnage de 256 Hz. Le signal a été filtré de façon numérique. Un filtre passe-bas de 5^e ordre a été réalisé par convertisseur analogue numérique, de façon à éliminer les activités biologiques parasites. Trois électrodes ont été placées à droite de l'œil droit, à gauche et en bas de l'œil gauche pour enregistrer les mouvements oculaires. L'acquisition des signaux EEG s'est faite en continu et des repères correspondant aux différents événements de la tâche (Encodage, Indice de rappel, Test, Réponse motrice) ont été enregistrés sur le signal.

2.5 Résumé de la procédure

La participation de chaque enfant s'est faite en deux séances. Au cours de la première séance, l'enfant et ses parents ont été informés des détails de l'étude et ils ont été invités à donner leur accord. Les parents ont signé le formulaire de consentement et rempli un court questionnaire. Ensuite, l'enfant a été soumis aux tests auditifs et cognitifs. La durée de cette première séance était d'environ 60 minutes. Au cours de la deuxième séance, chaque enfant a tout d'abord appris la tâche lors d'un court entraînement. Lorsque 5 essais consécutifs sur 10 étaient réussis, l'expérimentation commençait. La durée de l'expérimentation comprenant le test de rappel actif auditif et les enregistrements EEG était de 40 à 50 minutes. La durée totale de la présence de l'enfant au laboratoire était d'environ 75-90 minutes.

2.5.1 Entreposage des données

Les renseignements privés ont été entreposés dans un classeur sous clé durant toutes les étapes du processus de recherche incluant le recrutement, la collecte de données ainsi que tous les tests comportementaux.

Toutes les procédures ont été conduites par la même équipe de trois chercheuses. Les données étaient identifiées par un code alphanumérique afin de garantir l'anonymat des participants.

2.6 Analyses

2.6.1 Analyses des données comportementales

Chaque enfant a été testé sur les deux composantes du test de discrimination auditive de Gordon E., *Primary Measure of Music Audiation (K-Grade 3; 1979, 1986)*. Ce test est normalisé selon l'âge respectif des enfants.

Pour chaque enfant, à partir des deux sous-tests du WISC-IV⁹ (Flanagan et Kaufman, 2004), différents scores de rappel ont été obtenus: le rappel sériel de chiffres, de lettres et de chiffres, l'empan du rappel sériel, l'indice de la mémoire de travail ainsi que le rang percentile des participants. Le WISC-IV est une batterie d'évaluation de l'efficacité intellectuelle pour les enfants âgés de 6 à 16 ans. Pour chacune des échelles, la distribution des sommes de scores d'équivalences a été normalisée selon l'âge respectif des enfants et une moyenne de 100 et un écart-type de 15 ont été imposés dans cette édition. Un score de 100 de n'importe laquelle des composantes

⁹ Nous avons utilisé la 4e édition, version francophone du Canada (2005) de l'échelle de Weschler, appelée le WISC-IV.

définit la performance moyenne d'un enfant d'âge similaire. Ainsi, des scores de 85 et de 115 ont respectivement 1 écart-type en dessous et au-dessus de la moyenne. Cette normalisation assure que les distributions des composantes s'approchent de la courbe normale pour l'échantillon de validation.

Afin de comparer la performance des deux groupes dans les différentes conditions des tests, une ANOVA à mesures répétées a été effectuée pour les tests du Gordon's PMMA alors que pour les sous-tests du WISC-IV, nous avons réalisé un test t.

2.6.2 Analyses des données expérimentales

Les effets de la pratique musicale ont été analysés en comparant la performance de rappel actif et les signaux neurologiques correspondants entre les musiciens et les non-musiciens. Le nombre de participants dans cette étude ne nous a pas permis d'analyser les résultats sur la tâche de rappel selon l'âge des enfants.

2.6.2.1 Analyse des résultats comportementaux sur la tâche de rappel

La performance de rappel de chaque participant a été établie en considérant le taux de réussite et le temps de réaction moyen pour effectuer la réponse, mesurée à partir du logiciel ÉLAN. Les temps de réaction ont été mesurés uniquement pour les bonnes réponses. Une ANOVA à mesures répétées a été effectuée pour les données comportementales sur la tâche de rappel actif auditif afin de savoir s'il y avait une différence significative pour les trois différentes conditions (rappel de la fréquence, de la durée et condition contrôle) entre musiciens et non-musiciens. Un ajustement Bonferroni a été nécessaire pour les comparaisons multiples.

La première mesure pour tous les participants (mus : N = 20, 16 filles et non-mus : N = 19, 11 filles) était le taux de réussite selon les variables dépendantes de durée (dur), fréquence (fq) et la condition contrôle (con). L'hypothèse de sphéricité de Mauchly sur les effets intrasujets sur la tâche indiquait une significativité de $p < 0,05$. La deuxième mesure fut les temps de réaction en ms selon les mêmes variables dépendantes de durée (TrDur), fréquence (TrFq) et la condition contrôle (TrCon). L'hypothèse de sphéricité de Mauchly sur les effets intrasujets sur la tâche indiquait $p < 0,05$.

2.6.2.2 Analyses des résultats électroencéphalographiques

Les données de 6 musiciens et 5 non-musiciens ont été écartées pour les analyses électroencéphalographiques pour des raisons de problèmes techniques ou trop de mouvements de l'enfant. Les données de 14 musiciens et 14 non-musiciens ($n = 28$) ont été considérées aux fins d'analyse des données électroencéphalographiques sur la tâche de rappel actif auditif.

L'analyse des signaux électroencéphalographiques (EEG) a été réalisée avec le logiciel ELAN (Aguera *et al.*, 2011). Les signaux ont tout d'abord été inspectés visuellement pour vérifier que l'acquisition était satisfaisante au niveau de chacun des canaux. Si un canal posait problème, il était retiré de l'analyse EEG. Au total, 19 canaux ont été sélectionnés soit : F3, P3, Pz, FCz, P4, F7, P7, Fz, Cz, P8, C3, O1, F4, C4, O2, T7, Oz, F8 et T8. Les données ont ensuite été filtrées de 0.1 à 50 Hz. Les artefacts liés aux mouvements oculaires ont été corrigés et tout artefact dépassant $\pm 100 \mu\text{V}$ a été automatiquement rejeté. Le signal a été segmenté d'après les repères de la tâche et seule la période correspondant à l'indice de rappel visuel a été conservée et analysée pour ce mémoire, car il s'agit de la période principale de rappel. D'autres

analyses seront conduites ultérieurement pour les périodes d'encodage et de réponses. Une correction de ligne de base a été réalisée en utilisant la période précédant l'initiation de la question sur une durée de 200 ms. Les segments d'EEG ont été moyennés pour les essais réussis pour chaque condition, à savoir la condition contrôle, le rappel de la fréquence et le rappel de la durée.

Les potentiels obtenus dans chacune des conditions ont été comparés entre musiciens et non-musiciens avec un test non paramétrique Kruskal-Wallis. Les effets du rappel ont été mesurés avec un test non paramétrique de Wilcoxon.

CHAPITRE III

RÉSULTATS

3.1 Données comportementales

Les résultats aux tests psychologiques effectués montrent que tous les participants retenus (n = 40) étaient droitiers, qu'aucun d'eux n'avait l'oreille absolue (Zatorre, 2003) et que tous avaient un seuil d'audition normale à ≤ 20 dBHL bilatérale pour les fréquences 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz et 4000 Hz. Les résultats aux tests comportementaux en perception et mémoire auditive sont présentés dans les prochaines sections.

3.1.1 Gordon's Primary Measure of Music Audiation

Les deux épreuves de passation du test discrimination auditive Gordon's PMMA (1979, 1986) ont mesuré l'aptitude de l'enfant à discriminer la similitude ou la différence entre 40 paires de séries de hauteurs de notes (fréquences) puis 40 paires de séries de rythmes (durées). À ces deux tests, les participants ont eu des scores allant de 14 % à 100 % de réussite. Les résultats de l'ANOVA à mesures répétées ont montré que les musiciens étaient meilleurs que les non-musiciens pour discriminer deux séries de hauteurs de notes ($p < 0,05$) et deux séries de rythmes ($p < 0,05$) que les non-musiciens (voir fig.3.1). Par contre, pour tous les participants, on ne constate aucune différence significative entre le traitement de la hauteur des sons et de la

durée (test t : mus = 0,95; non-mus = 0,41). Nous avons effectué un test intra-sujets, l'hypothèse de sphéricité de Mauchly n'étant pas respectée, nous avons utilisé la correction de Greenhouse-Greisser. Les résultats démontrent que le traitement de groupe a été significatif ($p = 0,038$).

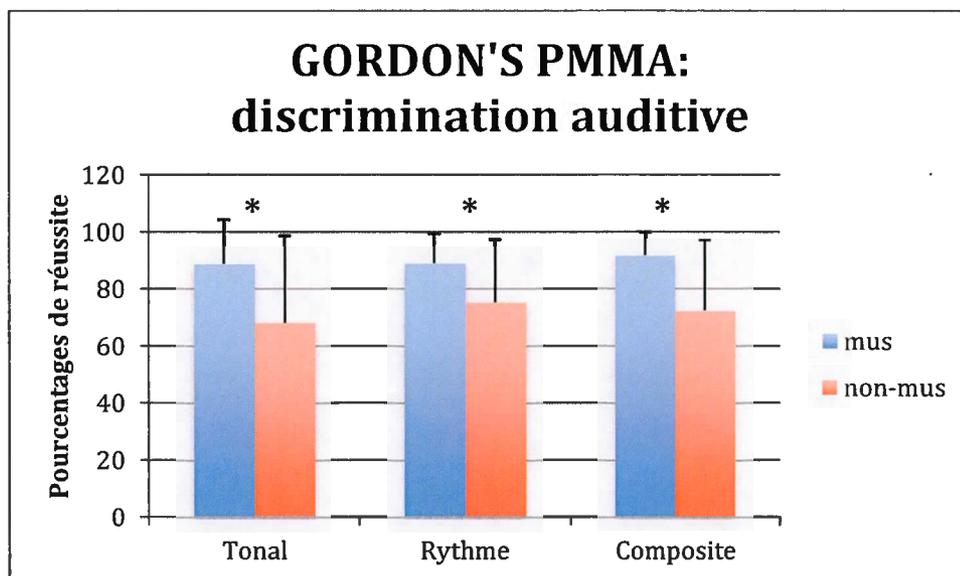


Figure 3.1 Résultats du test de discrimination auditive Gordon's PMMA (1979, 1986), mesurant la différence entre deux suites de sons sur les composantes de hauteur (tonal), de durée (rythme) et la moyenne des deux composantes (composite)¹⁰

Il est à noter que le test statistique du Gordon's PMMA est normalisé selon les niveaux d'âge. La différence entre les moyennes d'âge des deux groupes (mus = 10,04 ans; non-mus = 9,46 ans) n'était pas significative ($p = 0,11$) et ne pouvait avoir d'effet sur les données. Une ANOVA à mesures répétées a révélé que l'échantillon des participants n'était pas suffisamment large pour faire une analyse différente selon le genre ($p < 0,05$).

¹⁰ Les résultats significatifs ($p < 0,05$) sont indiqués avec un astérisque (*).

3.1.2 WISC-IV

La mémoire de travail auditive a été mesurée pour cette étude par le rappel sériel de chiffres, de lettres et chiffres, l'empan du rappel sériel, l'indice de la mémoire de travail ainsi que le rang percentile des participants. Le rappel de chiffres est obtenu en additionnant les résultats normalisés des rappels de séries de chiffres de plus en plus longs en ordre entendu (SCOD) et inverse (SCOI). Une autre tâche consistait à rappeler une série de chiffres et de lettres entendus en désordre, de manière à ce que les chiffres soient nommés en premier dans l'ordre croissant puis les lettres, dans l'ordre de l'alphabet, ces séries étant présentées de plus en plus longues. Les scores des participants sont détaillés dans le tableau 3.1 et illustrés dans les figures 3.2, 3.3. et 3.4. Une analyse selon un test t pour l'égalité des moyennes a été appliquée (voir tableau 3.2).

Tableau 3.1 Scores moyens par groupe de participants aux sous-tests du WISC-IV : rappel de chiffres en ordre direct et indirect (Chiffres %), lettres et chiffres en ordre indirect (Lettres et chiffres %), séries de chiffres en ordre direct (SCOD), séries de chiffres en ordre indirect (SCOI), indice de mémoire de travail (IMT) et rangs percentiles (RgPC)

	Chiffres (%)	Lettres et chiffres (%)	SCOD (%)	SCOI (%)	IMT	RgPC
Musiciens	34	38	69	63	101,75	63,65
Non-musiciens	39	38	71	67	107,76	64,74

On constate que les performances moyennes des deux groupes sur la tâche de rappel SCOD sont plus élevées que celles exigeant un rappel SCOI, mais sans que cette différence soit significative ($p = 0,147$). Aucune différence significative n'a été démontrée entre les deux groupes pour ces deux tests (SCOD : $p = 0,801$; SCOI : $p = 0,641$; voir figure 3.2. et tableau 3.1).

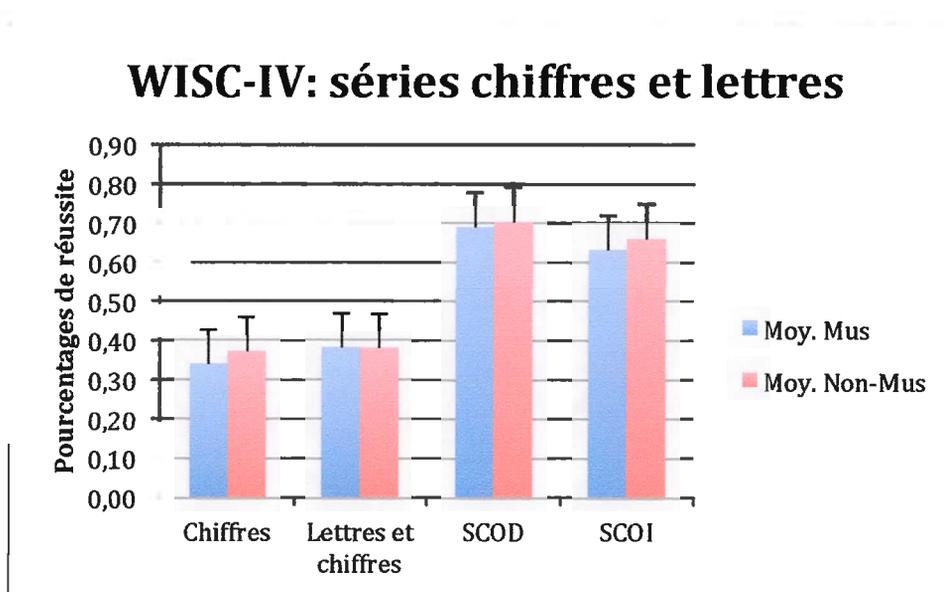


Figure 3.2. Scores moyens par groupes de participants aux sous-tests du WISC-IV : rappel de chiffres en ordre direct et indirect (Chiffres), lettres et chiffres en ordre indirect (Lettres et chiffres), séries de chiffres en ordre direct (SCOD), séries de chiffres en ordre indirect (SCOI). Les équivalents des sommes des scores d'équivalence ont été obtenus selon des intervalles de confiance à 95 %

L'indice de mémoire de travail (IMT), qui se mesure en additionnant les scores d'équivalences de tous les tests de rappel et en se rapportant aux tables de l'échelle d'intelligence, ne démontre aucune différence significative entre les deux groupes (IMT : $p = 0,427$; voir fig.3.3 et tableau 3).

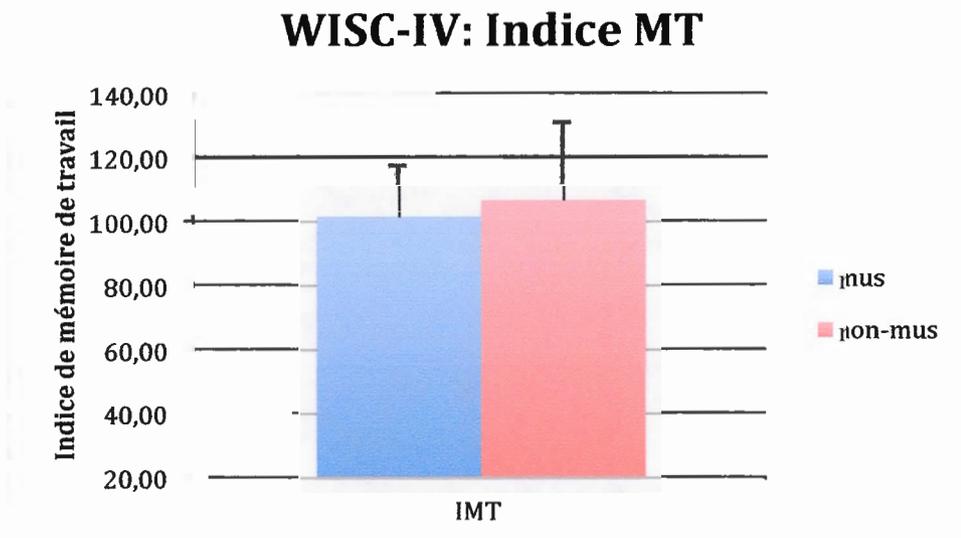


Figure 3.3 Indices de mémoire de travail (IMT). Les scores d'équivalence ont été obtenus selon des intervalles de confiance à 95 %

Afin d'évaluer plus en profondeur la performance de l'enfant, deux scores de traitement de l'information sont ajoutés dans le WISC-IV : l'empan de rappel en séries de chiffres en ordre direct les plus longues (SCDL) et l'empan de rappel en séries de chiffres en ordre indirect les plus longues (SCIL). Ces scores indiquent les résultats bruts du nombre de chiffres rappelés au dernier essai réussi dans la tâche correspondante du sous-test *Séquence de chiffres*. Les scores moyens obtenus dans les deux groupes sont présentés dans la figure 3.4. Aucune différence significative entre les deux groupes n'a été révélée par ces deux tests (SCDL : $p = 0,454$; SCIL : $p = 0,504$).

WISC-IV: emfans de rappels sériels

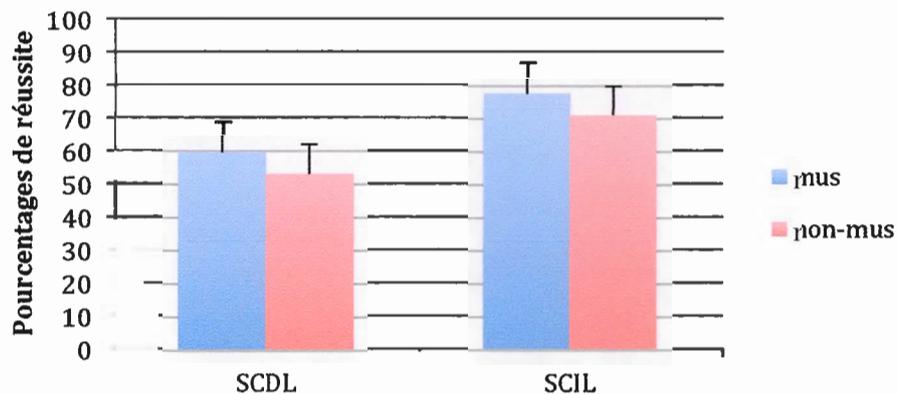


Figure 3.4. Emfans de rappels sériels : chiffres en séries les plus longues, en ordre direct (SCDL) ou indirect (SCIL).

Somme toute, aucun traitement du WISC-IV n'a démontré d'effet significatif entre les deux groupes (voir sommaire au tableau 3.2).

Tableau 3.2 Résultats aux tests t des échantillons indépendants pour les performances du WISC-IV. Le test t pour l'égalité des moyennes a été obtenu avec un intervalle de confiance selon la différence à 95 %

Tests du WISC-IV	Sig. (bilatéral) inter-groupe
% chiffres	, 376
% lettres et chiffres	, 930
% SCOD	, 801
% SCOI	, 641
IMT	, 427
RgPC	, 952
SCDL	, 454
SCIL	, 504

3.1.3 Tâche expérimentale : données comportementales

Lors de la deuxième séance, l'un des participants s'est retiré de l'étude. Les statistiques suivantes portent donc sur 20 enfants musiciens et 19 enfants non musiciens. L'échantillon des participants était représentatif selon des intervalles de confiance de 95 %.

3.1.3.1 Taux de réussite

Une ANOVA à mesures répétées a démontré que pour la tâche de rappel total, une différence significative ($p < 0,05$) a été révélée entre les deux groupes, mais aucune différence significative n'a été démontrée pour la condition contrôle ($p = 0,462$). Ainsi, les musiciens ont été plus performants que les non-musiciens en rappel, mais aucune différence entre les groupes n'a été constatée en condition contrôle. De façon plus détaillée, les analyses montrent que le taux de réussite des enfants musiciens ($n = 20$) était significativement supérieur à celui des enfants non musiciens ($n = 19$) pour le rappel de la durée ($p < 0,05$) et pour le rappel de la fréquence ($p < 0,05$).

Pour les deux groupes d'enfants, les scores obtenus en condition contrôle étaient significativement supérieurs aux scores obtenus en condition de rappel ($p < 0,05$). Ainsi, que les enfants soient musiciens ou non, la condition contrôle était plus facile à effectuer que la condition de rappel. Les taux de réussite des enfants dans les trois conditions (rappel de la fréquence, rappel de la durée et condition contrôle) sont détaillés et différenciés dans le tableau 3.3 et la figure 3.5.

Tableau 3.3 Statistiques descriptives indiquant les moyennes des taux de réussite des deux groupes pour les essais de rappel et les essais contrôles selon un intervalle de confiance à 95 % pour les comparaisons multiples

	mus/non-mus	Moyenne	Écart-type	Sig. (bilatéral)
Rappel total	mus	83,23	,06	0,00
	non-mus	72,61	,10	
Rappel de la durée	mus	80,25	,07	0,02
	non-mus	73,57	,10	
Rappel de la fréquence	mus	86,21	,09	0,00
	non-mus	71,64	,13	
Condition contrôle	mus	95,35	,03	0,46
	non-mus	94,37	,05	

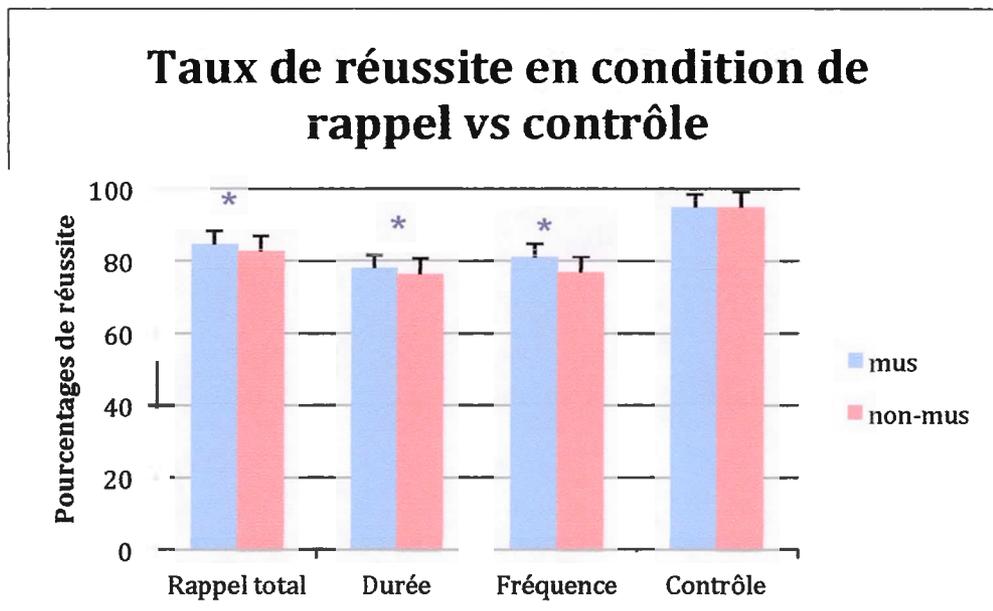


Figure 3.5 Taux de réussite sur la tâche de rappel actif auditif pour les essais de rappel et les essais contrôlés¹¹

¹¹ Les résultats significatifs ($p < 0,05$) sont indiqués avec un astérisque (*).

Une seconde analyse ANOVA à mesures répétées nous a permis de voir un effet de tâche. En effet, une différence significative ($p < 0,05$) entre le rappel de la durée et celui de la fréquence a été observée au sein du groupe de musiciens : on constate que la performance de rappel était meilleure pour la fréquence que pour la durée ($p < 0,05$; voir fig.3.6). Chez les non-musiciens, on ne constate pas de différence significative ($p = 1,00$) entre le rappel de la fréquence et celui de la durée.

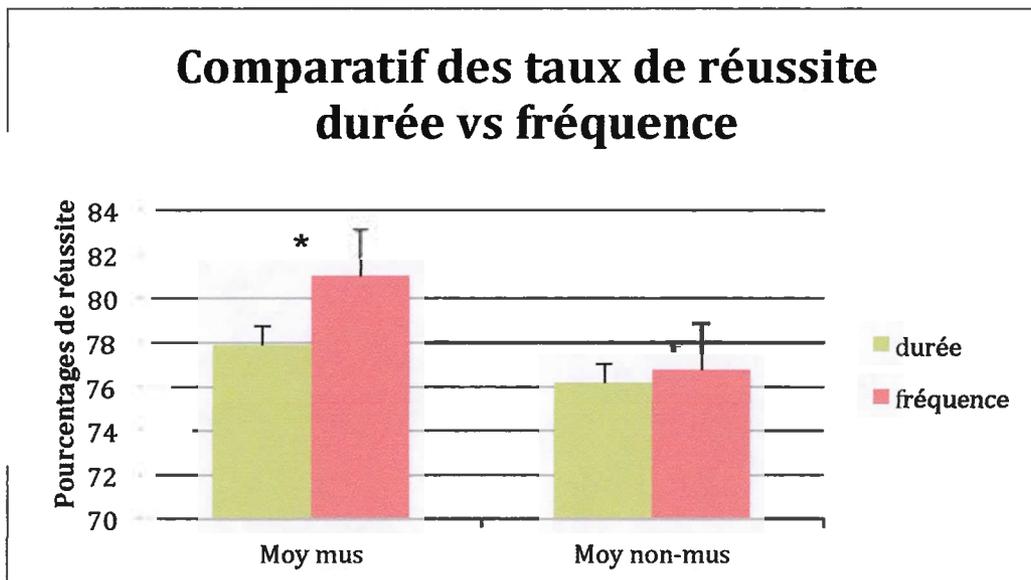


Figure 3.6 Comparatif des taux de réussite durée vs fréquence¹²

3.1.3.2 Temps de réaction

Pour les temps de réaction, nous avons analysé les résultats selon les mêmes variables dépendantes soit la durée (TrDur), la fréquence (TrFq) et la condition contrôle (TrCon). L'hypothèse de sphéricité de Mauchly sur les effets inter-sujets sur la tâche indiquait $p < 0,05$. Les résultats démontrent de façon significative que les enfants musiciens étaient plus rapides que les enfants non musiciens pour donner leur réponse

¹² Les résultats significatifs ($p < 0,05$) sont indiqués avec un astérisque (*).

motrice, que ce soit pour le rappel de la durée ($p < 0,05$), de la fréquence ($p < 0,05$) ou pour la condition contrôle ($p < 0,05$) (voir tableau 3.4 et fig.3.7).

De façon plus détaillée, pour la durée, on constate une différence de temps de réaction de 274,85 ms ($p < 0,05$); pour la fréquence, on observe une plus grande différence de 621,05 ms ($p < 0,05$); pour la condition contrôle, les musiciens sont toujours plus rapides avec une différence de 379,60 ms ($p < 0,05$). Le tableau 3.4 décrit les statistiques descriptives des moyennes des temps de réaction pour les deux groupes de participants dans les trois conditions.

Tableau 3.4 Statistiques descriptives indiquant les moyennes des temps de réaction en millisecondes (ms) sur les différentes tâches en condition de rappel et de contrôle

		Moyenne (ms)	Erreur type
Moyenne temps de réaction : rappel de la durée	mus	2116	365
	non-mus	2391	304
	total	2250	360
Moyenne temps de réaction : rappel de la fréquence	mus	1832	407
	non-mus	2453	397
	total	2134	507
Moyenne temps de réaction : condition contrôle	mus	2707	310
	non-mus	3087	374
	total	2892	389

Concernant les temps de réaction intra-groupe, ceux des enfants musiciens étaient plus courts ($p < 0,05$; différence de 284,22 ms) pour le rappel de la fréquence que pour le rappel de la durée. À l'inverse, les temps de réaction des non-musiciens étaient plus courts pour le rappel de la durée que pour le rappel de la fréquence, mais de façon non significative ($p = 0,71$; différence de 61,97 ms). Toutefois, considérant que l'enfant devait attendre parfois la fin d'un son pour évaluer sa durée, ces deux

résultats ne peuvent être considérés¹³. Seuls les temps de réaction inter-groupe pour les mêmes conditions testées peuvent être comparés (voir fig. 3.7).

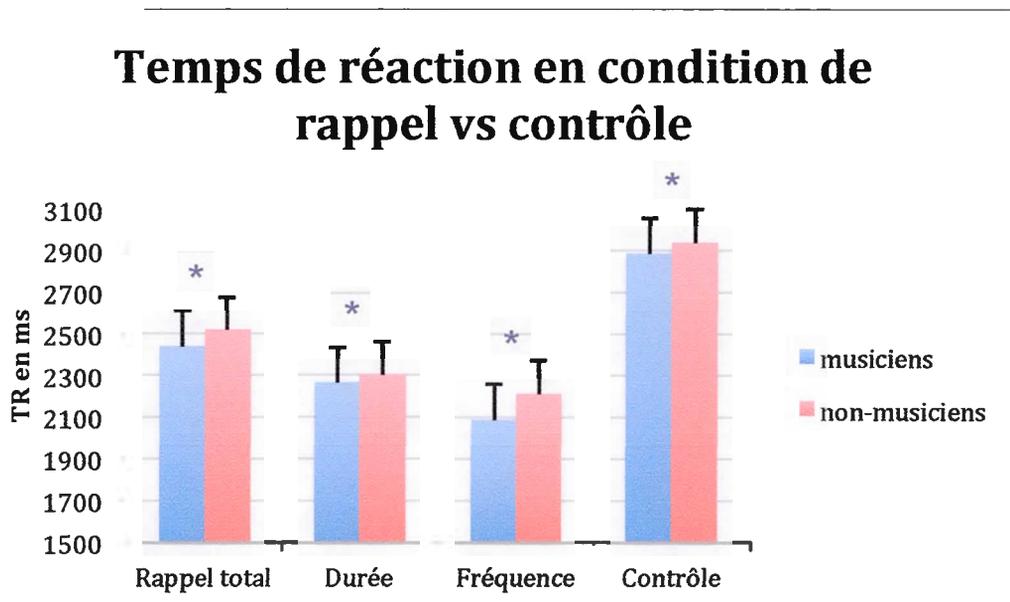


Figure 3.7 Temps de réaction moyens (TR) en condition de rappel et de contrôle¹⁴

Une différence significative confirme donc la plus grande rapidité des musiciens à effectuer leurs réponses motrices pour chaque condition (fig.3.7).

¹³ Par exemple, pour le rappel de la durée, si le 1er stimulus durait 1000 ms, il fallait attendre l'écoute d'au moins un peu plus de 1000 ms pour le 2e stimulus afin de déterminer si sa durée était identique ou différente du 1er stimulus. Dans le cas de la fréquence, dès le début du 2e stimulus l'enfant pouvait effectuer sa réponse.

¹⁴ Les résultats significatifs ($p < 0,05$) sont indiqués avec un astérisx (*).

3.2 Données électroencéphalographiques

Les résultats retenus et présentés dans cette section sont les différences dans les signaux électroencéphalographiques (EEG) qui sont apparues significatives à deux niveaux :

- Différences significatives entre les enfants musiciens et non musiciens;
- Différences significatives entre les essais contrôle et rappel.

Une des principales différences dans l'activité neurologique associée au rappel auditif entre enfants musiciens et non musiciens était une négativité soutenue chez les non-musiciens au niveau frontal gauche entre 400 et 600 ms (voir fig. 3.8) après l'indice de rappel visuel. Cette onde négative était de plus petite amplitude et moins soutenue chez les musiciens. Cette négativité soutenue était présente pour le rappel de la fréquence, mais pas pour celui de la durée.

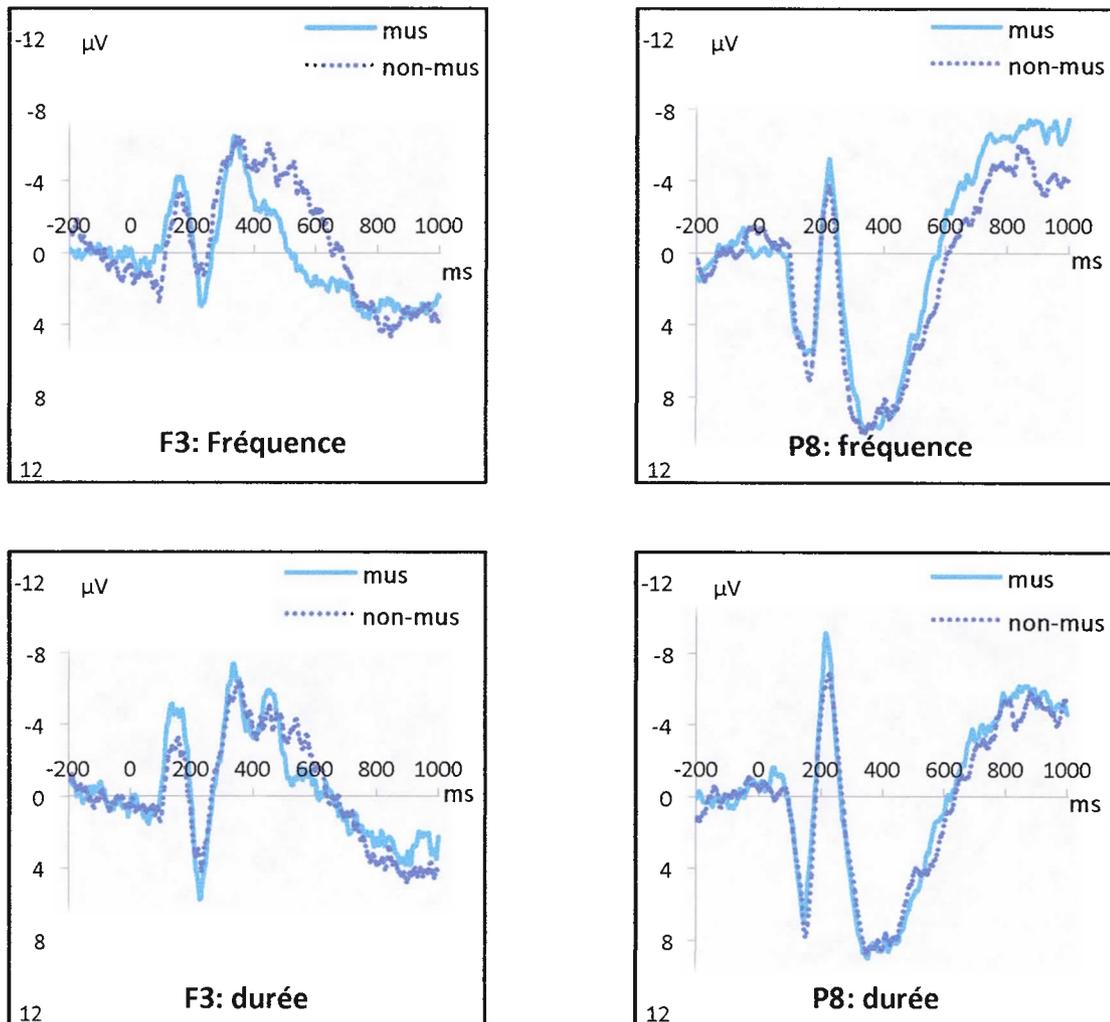


Figure 3.8 Effets de tâche au niveau frontal et pariétal. Potentiels moyens enregistrés au niveau frontal gauche (F3) et pariétal droit (P8) chez les musiciens et les non-musiciens. Le temps 0 ms correspond à l'initiation de l'indice visuel

Afin de s'assurer que les différences considérées pouvaient être attribuées à la tâche de rappel, nous avons effectué une analyse comparant les signaux EEG en condition de rappel de la fréquence et en condition contrôle (voir. fig.3.9). Tant chez les musiciens que les non-musiciens, une différence significative ($p < 0,05$) entre 200 ms et 650 ms a été observée entre le rappel et le contrôle dans la région frontale au

niveau de l'hémisphère gauche. La différence de potentiels observée entre musiciens et non-musiciens touche donc spécifiquement une activité liée au rappel.

Par ailleurs, comme le montre la figure 3.8, le rappel était associé à une onde P300 au niveau pariétal, mais il n'y avait pas de différence entre musiciens et non-musiciens.

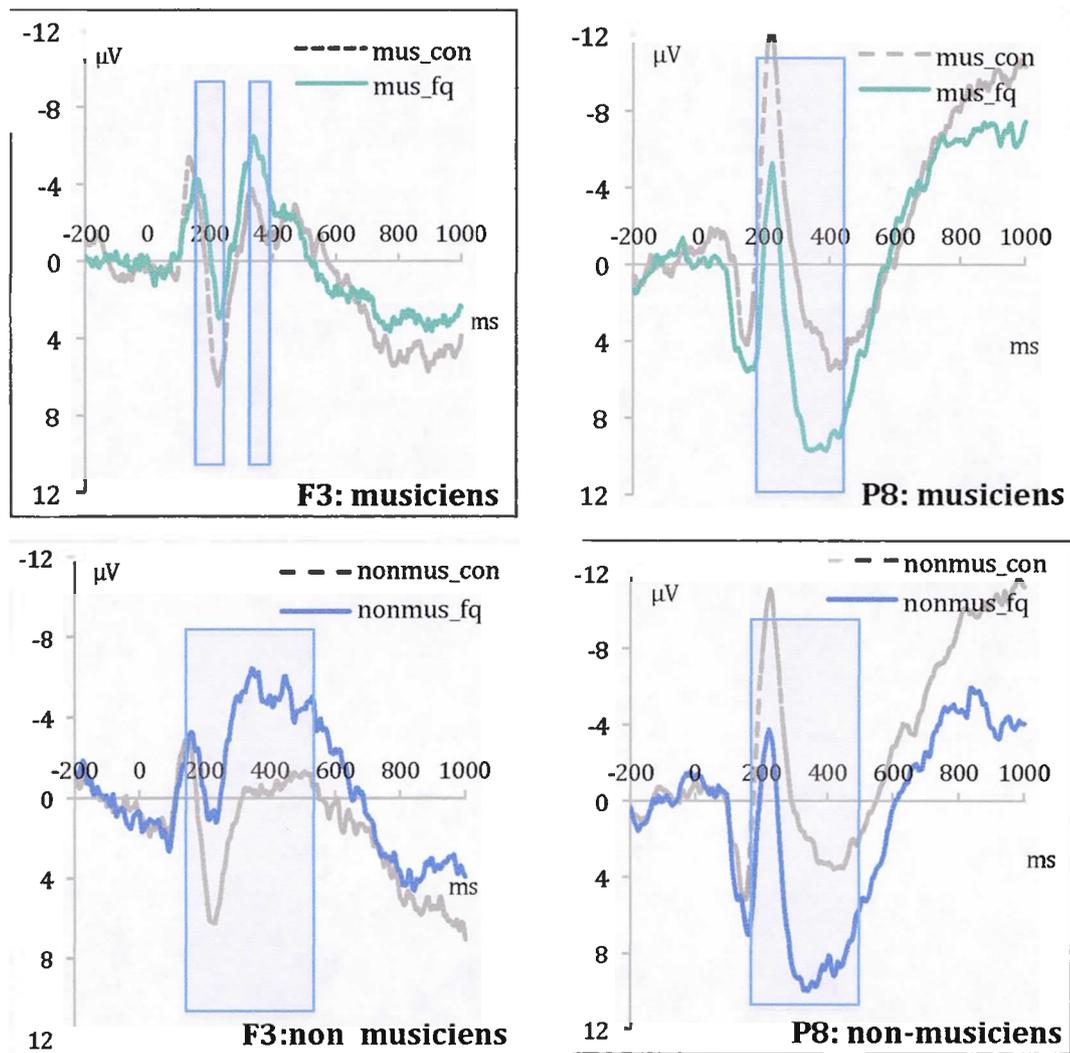


Figure 3.9 Potentiels moyens enregistrés comparant les conditions contrôle et rappel de la fréquence dans les régions frontales (F3) et pariétales (P8)¹⁵

¹⁵ Les résultats significatifs ($p < 0,05$) sont indiqués par la bande grise.

CHAPITRE IV

DISCUSSION

L'immortalité des écrits du philosophe Platon (1578) engage une réflexion sur la musique : " La musique donne une âme à nos cœurs et des ailes à la pensée ". La musique n'agit pas simplement en tant qu'art pouvant exprimer nos émotions, nos états d'âme. Elle sert aussi la pensée, car elle lui permet, comme le démontrent les études récentes en sciences cognitives (Habibi *et al.*, 2017; Kraus *et al.*, 2012; Strait *et al.*, 2015), de se développer puis de bonifier le réseau neuronal complexe qui lui sert de support d'expression. La recherche relatée dans ce travail s'intègre aux données scientifiques actuelles puisqu'elle a pour objectif de comprendre les effets de la pratique musicale sur la mémoire de travail, fonction exécutive essentielle à l'expression et au développement de la pensée. À cette fin, nous avons étudié une fonction spécifique de la mémoire de travail, le rappel actif, qui sert à isoler et sélectionner une information en mémoire dans un contexte ambigu. Cette fonction capitale au cours de tout processus d'apprentissage peut être sollicitée sous différents modes sensoriels. Cette recherche cible le mode sensoriel qui est constamment en éveil dans un cadre d'apprentissage instrumental à savoir l'audition.

4.1 Première hypothèse

Au début de la recherche, trois hypothèses avaient été émises et les résultats obtenus suite aux analyses les confirment. La première hypothèse de la présente recherche était que les enfants musiciens âgés de 7 à 11 ans auraient un taux de réussite

supérieur dans le rappel actif auditif à celui des enfants non musiciens. Les résultats confirment que le taux de réussite des enfants musiciens était significativement supérieur à celui des enfants non musiciens pour le rappel de la fréquence ainsi que pour le rappel de la durée. Par contre, dans la condition contrôle, les taux de réussite des deux groupes d'enfants étaient équivalents. Il serait logique de supposer qu'il est plus facile de se souvenir d'un élément en mémoire que l'on perçoit mieux. Si la discrimination se fait sans trop d'effort, l'accès à la mémoire en est facilité! Par conséquent, les musiciens devraient être avantagés par leurs facultés perceptuelles auditives supérieures. Or, dans la condition contrôle, les résultats sont équivalents dans les deux groupes (rappelons que la condition contrôle ne fait appel qu'à la discrimination entre la même composante de deux sons verbaux), ce qui signifie que les musiciens n'avaient pas forcément d'avantage pour percevoir les sons verbaux. Les résultats de cette recherche démontrent donc un effet spécifique de la pratique musicale. Les enfants musiciens ont une capacité supérieure à se rappeler des caractéristiques de fréquence ou de durée des sons vocaux comparativement aux enfants non musiciens alors que leur capacité de discrimination pour ce même type de stimuli est comparable. Mais comment expliquer que les performances discriminatoires en condition contrôle soient similaires au sein des deux groupes alors que selon le prétest de discrimination auditive (Gordon's PMMA) les musiciens ont surpassé les non-musiciens?

Lors des prétests comportementaux de discrimination auditive (Gordon's PMMA), nous avons constaté une différence significative entre les performances discriminatoires des musiciens et celles des non-musiciens. En effet, les musiciens ont obtenu des moyennes supérieures aux non-musiciens pour discriminer des séries de hauteur et de rythmes. Nos résultats sur ces prétests, en accord avec des études récentes (Habibi *et al.*, 2016; Kraus *et al.*, 2014; Moreno *et al.*, 2009; Strait *et al.*, 2014), confirment que les enfants s'exerçant sur leur instrument quotidiennement deviennent des experts pour analyser la hauteur et la durée des sons au niveau perceptuel. Pour des enfants musiciens, il était probablement plus facile de discriminer des séries de notes et de rythmes tel que présentées dans le Gordon's

PMMA parce qu'en répétant leur instrument quotidiennement, les musiciens sont habitués à faire des liens perceptuels entre des notes ou des durées de sons. L'étude de Hyde (2009) confirme des différences d'activation significatives dans les régions temporales et pariéto-temporales des deux hémisphères lorsque des enfants musiciens et non musiciens réalisent des tâches de discrimination mélodiques et rythmiques.

Malgré cette supériorité des musiciens au test Gordon's PMMA, la performance des deux groupes d'enfants dans la tâche expérimentale était équivalente en condition contrôle. Plusieurs éléments peuvent expliquer cet écart. Tout d'abord, un enfant musicien s'est retiré des tests de rappel ce qui pourrait limiter la comparaison entre les performances aux prétests et à la tâche de rappel. Toutefois, nous pensons que l'élément déterminant repose davantage sur les stimuli utilisés. Lors du prétest Gordon's PMMA, les stimuli étaient des sons purs ayant pu avantager les musiciens. En effet, les non-musiciens ne sont pas quotidiennement exposés et entraînés à discriminer des séries de sons ou de rythmes comme le font les musiciens. Par contre, les stimuli verbaux émis par une voix humaine (sons réels, naturels et langagiers) ne favorisaient pas plus les musiciens que les non-musiciens. Les résultats en situation contrôle (discrimination), identiques entre les deux groupes, attestent qu'il était judicieux d'utiliser dans cette recherche des stimuli verbaux et non musicaux.

Mais pourquoi les stimuli verbaux ont-ils été discriminés de façon équivalente dans les deux groupes? La hauteur des sons est un élément prosodique essentiel dans la compréhension du langage et fait partie des éléments les plus précoces à se mettre en place au moment de l'acquisition de la langue maternelle (Dodane, 2011). Selon Patel (2007) et Lidji (2008), la prosodie ou mélodie de la parole est formée par les variations de hauteur fournissant des informations sur l'état émotionnel du locuteur, par l'intonation de la phrase (les indices de contour permettent par exemple de discriminer questions et affirmations) et l'accentuation. C'est donc dire de l'importance primordiale de discriminer les différences de hauteur des sons dès le plus jeune âge afin que l'enfant puisse bien communiquer avec son entourage et exprimer ses besoins.

Le choix de stimuli verbaux a donc effectivement pu contribuer à l'égalité des performances des non-musiciens. D'autre part, il est aussi possible de penser que ces stimuli verbaux, émis dans un contexte contrôlé sans bruit, sans contours mélodiques (stimuli non sériels) et sans grand besoin de discrimination phonologique (les stimuli étaient toujours émis avec la même syllabe /da/) ont permis un niveau de discrimination relativement aisé pour tous les participants.

En résumé, ces résultats démontrent clairement que les enfants musiciens sont meilleurs pour isoler en mémoire une information auditive verbale, et ce, pour un niveau de discrimination qui apparaît comme équivalent avec les non-musiciens. Cette supériorité était encore plus grande pour le rappel de la fréquence que celui de la durée. Ce constat des performances supérieures du rappel de la fréquence d'un son chez les enfants musiciens laisse supposer que la pratique du violon ou du violoncelle exerce une influence positive sur la fonction de rappel et que cette influence est plus importante pour le rappel de la fréquence que celui de la durée. Une explication à ces meilleures performances de rappel de la fréquence chez les musiciens pourrait être attribuée à leur instrument, le violon et le violoncelle. En effet, ces types d'instruments exigent une vigilance constante et précise de l'ajustement de la hauteur du son émis en réglant la position des doigts de la main gauche. Par conséquent, les violonistes et les violoncellistes développeraient une grande expertise pour le rappel de la hauteur des sons.

Une autre évidence qui suggère que les enfants musiciens développent spécifiquement leurs capacités de rappel est la performance mnésique aux tests du WISC-IV et à la tâche. Lors des tests du WISC-IV il n'y avait aucune différence entre musiciens et non-musiciens, alors que dans la tâche expérimentale de rappel, les musiciens étaient meilleurs.

Comment expliquer qu'aucune différence n'ait été constatée lors des tests du WISC-IV alors que sur la tâche de rappel la différence est significative? Zuk et ses

collaborateurs (2014) ont rapporté des résultats similaires entre musiciens et non-musiciens pour le rappel de chiffres en ordre inverse chez l'enfant, mais pas chez l'adulte. Cependant, plusieurs autres études ont rapporté des différences entre musiciens et non-musiciens pour cette même tâche, tant chez l'enfant que chez l'adulte (Fujioka *et al.*, 2006; George et Coch, 2011). Zuk (2014) suggère que l'écart entre ces résultats pourrait être dû à un effet développemental ou encore à l'interaction entre l'âge de l'enfant et la durée totale de son entraînement. Selon les résultats d'une étude ayant utilisé le WISC-IV, il semblerait que les effets de la musique sur la mémoire de travail soient plus marqués pour les enfants âgés de 4 à 6 ans s'étant exercés musicalement depuis seulement un an (Fujioka *et al.*, 2006). Chez l'enfant plus âgé, un entraînement plus long serait nécessaire afin de remarquer des effets mnésiques mesurés avec le WISC-IV (Lee *et al.*, 2007). On constate que plus l'entraînement est long, plus les effets sur la mémoire de travail sont démontrés. Nos résultats sur le rappel ont été obtenus avec des enfants âgés de 7 à 11 ans et s'entraînant depuis en moyenne 3,26 ans. Peut-être faut-il un minimum de 3 ans d'entraînement musical pour obtenir des effets sur la mémoire de travail passé l'âge de 7-8 ans?

D'autre part, si l'on compare les demandes cognitives du WISC-IV avec celles de la tâche expérimentale, on constate que la manipulation de l'information n'engage pas les mêmes opérations mentales. Alors que le rappel de séries de chiffres et de lettres du WISC-IV exige de répéter une série d'éléments tel qu'entendue ou dans l'ordre inverse, dans la tâche de rappel de la présente étude, il est exigé de se souvenir d'une seule des deux composantes auditives (par exemple la fréquence) d'un seul son entendu en inhibant l'autre composante (par exemple la durée) et de comparer cette même composante avec celle d'un 2^e son entendu.

La fonction d'isoler une caractéristique d'un son pourrait être considérée comme étant plus difficile à réaliser que le simple rappel sériel et intégral d'éléments auditifs. Cela pourrait expliquer l'écart de performances entre les deux groupes. Le rappel sériel d'éléments auditifs ne nécessite pas de segmenter les différentes composantes d'un

son. Les meilleures performances des musiciens à cet égard suggèrent que la pratique musicale développe cette capacité à analyser les différentes composantes sonores et facilite leur rappel pour pouvoir les rappeler éventuellement et les manipuler distinctement.

4.2 Deuxième hypothèse

La deuxième hypothèse de cette recherche stipulait que les enfants musiciens auraient un temps de réaction plus rapide pour rapporter leurs réponses dans le rappel actif auditif que celui des enfants non musiciens. Les résultats inter-groupes indiquent que les enfants musiciens étaient plus rapides que les enfants non musiciens pour donner leur réponse motrice, que ce soit pour le rappel de la fréquence, de la durée ou pour la condition contrôle (voir fig.16). Ces résultats sont en accord avec les résultats de l'étude de Bergman et ses collaborateurs (2014) rapportant des bénéfices significatifs de la pratique musicale sur la mémoire de travail visuo-spatiale et verbale ainsi que sur la rapidité du traitement de l'information chez l'enfant. Rappelons que les temps de réaction intra-groupe entre les deux composantes (fréquence et durée) ne peuvent être comparés puisque l'enfant devait parfois — mais pas toujours! — attendre la fin du 2e stimulus pour comparer et émettre sa réponse alors qu'en rappel de la fréquence, il pouvait donner sa réponse dès le début de l'émission du 2e stimulus.

Concernant les temps de réaction inter-groupe, les musiciens étaient plus rapides que les non-musiciens tant pour le rappel de la fréquence que pour le rappel de la durée. Toutefois, l'écart observé entre musiciens et non-musiciens était plus grand pour le rappel de la fréquence que pour celui de la durée. Cela peut aisément être attribuable à leur entraînement aiguisé à constamment ajuster et coordonner rapidement leur doigté afin de régler la hauteur des sons. Les violonistes et violoncellistes ne pouvant pas compter sur des touches, des clefs ou des frettes pour obtenir les notes souhaitées, ils ajustent constamment le mouvement, la pression et l'endroit où se posent leurs

doigts afin de régler la hauteur des sons qu'ils doivent émettre. En ce sens, ils sont des experts de la hauteur des sons. Conséquemment, cette étude suggère que les enfants musiciens développeraient une meilleure préparation du mouvement, ce qui se traduirait par un temps de réponse plus court.

Somme toute, les musiciens sont plus rapides pour rapporter leurs réponses dans toutes les conditions testées. On peut attribuer cette rapidité soit (en tout ou en partie) à une plus grande rapidité motrice développée sur leur instrument de musique ou à une plus grande rapidité du processus d'analyse en mémoire de travail auditive ou les deux combinées.

4.3 Troisième hypothèse

La troisième hypothèse émise dans cette recherche était que la supériorité des musiciens pour le rappel se manifesterait aussi au niveau neurologique par des différences de signaux EEG entre musiciens et non-musiciens. La seule différence statistiquement significative qui est apparue entre un sous-échantillon de 17 musiciens et 17 non-musiciens pendant la période de rappel était une négativité frontale plus soutenue chez les non-musiciens que chez les musiciens au niveau frontal gauche entre 450 et 600 ms (voir fig. 3.8). Cette onde négative était présente pour le rappel de la fréquence, mais pas pour celui de la durée et n'apparaissait pas dans les essais contrôles. Le rappel était aussi associé à une onde P300 au niveau pariétal, mais il n'y avait pas de différence entre musiciens et non-musiciens.

Les potentiels évoqués informent des caractéristiques temporelles de différents processus cognitifs cérébraux. Au-delà de 300 ms, beaucoup de processus différents sont engagés, séparément ou en réseaux (Habibi *et al.*, 2017; Polich, 2007). Les ondes de potentiels évoqués moyennées représentent le profil temporel général de l'ensemble de ces processus (Shahin, 2006). Dans la présente recherche, les ondes

positives à 300 ms et négatives de 400 à 600 ms associées au rappel actif peuvent être interprétées comme la résultante des processus cognitifs neurologiques engagés dans le rappel actif chez l'enfant.

Plusieurs études ont démontré des différences de potentiels entre enfants musiciens et non musiciens mais la plupart du temps ces différences concernent des potentiels précoces associés à des processus sensoriels et perceptifs (Fujioka *et al.*, 2006; Habibi *et al.*, 2017; Trainor *et al.*, 2003) et touchent plus rarement des processus cognitifs. Certains auteurs ont démontré chez l'adulte des potentiels évoqués d'amplitude plus élevée chez les musiciens adultes à 100ms (N1), potentiels associés à l'attention (Pantev *et al.*, 1998; Trainor *et al.*, 2003). Plus récemment, Habibi (2017) et ses collaborateurs (2017) ont observé une onde N1 de plus grande amplitude chez les enfants musiciens, comparativement aux enfants sportifs ou ne recevant aucun entraînement.

Dans cette présente recherche, une des principales différences entre enfants musiciens et non musiciens était une négativité soutenue chez les enfants non musiciens au niveau frontal gauche entre 400 ms et 600 ms. Chez l'adulte, Shahin et al., (2006) ont observé des ondes négatives frontales à 450 ms et 600 ms dans des protocoles de *Stimulus discordant (Oddball)* faisant appel à la discrimination sémantique de mots entendus. Des analyses de sources ont suggéré que deux régions frontales étaient actives à ces deux moments — une activité frontale inférieure qui est, selon les auteurs, peut-être associée avec l'organisation de la recherche en mémoire et une activité frontale latérale gauche associée avec l'évaluation sémantique. Cette dernière activité était plus évidente à 600 ms et contribuerait à la décision de savoir si un stimulus auditif est une cible ou pas. Les résultats de la présente recherche concordent avec cette étude dans la mesure où la différence entre musiciens et non-musiciens est apparue en région frontale. Tant chez les musiciens que les non-musiciens, une négativité frontale était associée au rappel. Chez les non-musiciens, cette négativité soutenue —qui était plus faible en amplitude et en latence chez les musiciens— pourrait indiquer que les enfants non musiciens engagent d'autres mécanismes pour

isoler en mémoire une information spécifique. Il est possible que pour les non-musiciens, se souvenir de la fréquence ou de la durée d'un son soit plus difficile et dépendrait davantage d'une stratégie sémantique.

Cette différence de potentiels peut-elle être interprétée comme un effet de plasticité cérébrale due à la pratique musicale? Avec un protocole qui ne considère qu'un seul groupe d'âge et qui ne comporte que des mesures transversales, il est difficile d'établir des liens de causalité. Ces liens pourraient davantage être établis avec des protocoles d'entraînement longitudinaux comprenant une répartition aléatoire des enfants non musiciens dans des groupes avec et sans entraînement musical incluant des mesures avant et après la période d'apprentissage. Toutefois, la différence entre musicien et non-musiciens observée est cohérente avec des évidences rapportées chez l'adulte (George et Coch, 2011).

Une deuxième interprétation pourrait être que la pratique musicale fait en sorte que les enfants développent des mécanismes différents. L'enfant « spécialiserait » en quelque sorte son cerveau pour la musique. Comme le suggèrent Berti et ses collaborateurs (2006), les musiciens utiliseraient des processus ou des stratégies qui ne sont pas à la disposition des personnes qui n'ont aucune expérience musicale.

4.4 Discussion générale

L'étude présente démontre que les bénéfices de la pratique musicale touchent une fonction spécifique qui est le rappel actif. Le fait que la différence entre enfants musiciens et non musiciens soit frontale pourrait suggérer que la pratique musicale influence chez l'enfant les processus de rappel qui engagent le cortex préfrontal. Une analyse de source pourrait confirmer cette proposition.

Dans une étude en IRMf, Chen et al. (2008) ont démontré que les musiciens adultes avaient de meilleures performances comportementales que les non-musiciens, et recrutèrent davantage le cortex préfrontal durant l'exécution de la tâche. Ils avançaient que les habiletés supérieures des musiciens à organiser et maintenir une structure temporelle rythmique étaient reliées à une meilleure implication du cortex préfrontal opérant les fonctions de la mémoire de travail.

4.5 Limites et forces de la recherche

Dans le domaine de la recherche sur les effets de la pratique musicale, un enjeu majeur est de pouvoir apprécier, voire quantifier, l'expérience musicale des participants. Dans cette étude, des critères rigoureusement établis basés sur des études récentes ont été utilisés pour sélectionner les participants à l'intérieur de chaque groupe. Les enfants musiciens avaient un niveau moyen d'expérience sur leur instrument de 39,10 mois, soit un peu plus de 3 ans, qui variait de 20 à 70 mois. De plus, d'autres paramètres liés à la musique ont été examinés comme le niveau d'éducation des parents qui était comparable dans les deux groupes. L'acculturation musicale a été contrôlée par un questionnaire évaluant le nombre de personnes vivant avec l'enfant et pratiquant un instrument au moins trois par semaine incluant le participant (mus = 1,76; non-mus = 0,45).

Toutefois, certains autres aspects de l'expérience et de l'acculturation n'ont pas été contrôlés. Par exemple, nous n'avons pas évalué la qualité de l'entraînement musical, c'est-à-dire la façon dont l'enfant s'entraîne au quotidien sur son instrument à la maison (nombre de répétitions des passages difficiles à exécuter, temps de pratique quotidienne et hebdomadaire, habiletés attentionnelles, contexte d'entraînement, motivation, etc.). Ainsi, un enfant peut suivre des cours de violon durant trois ans et

être parvenu au même niveau d'interprétation qu'un autre enfant qui s'entraîne depuis seulement un an avec plus de rigueur, d'assiduité et de temps au quotidien.

De plus, un facteur qu'il serait important de contrôler dans des études futures est la méthode d'apprentissage de l'instrument. En effet, la méthode d'enseignement instrumentale utilisée peut varier d'un professeur à un autre en cours individuels. En effet, il existe plusieurs méthodes d'enseignement du violon et du violoncelle (par exemple Suzuki, Létourneau, Cousineau, Feuillard, Joubert, Hébert). Le professeur peut aussi opter pour un amalgame de ces méthodes, et compter sur toute une diversité de répertoire possible. Certaines écoles offrent aussi à l'élève la possibilité d'assister à des cours de théorie ou des cours de chorale. Tous ces aspects rendent très complexe l'évaluation de cet enseignement éclectique.

Enfin, nous n'avons pas examiné en profondeur le niveau d'acculturation musical des enfants, par exemple la fréquence d'écoute de musique au quotidien, la pratique d'un deuxième instrument, la fréquentation aux concerts de musique, la pratique antérieure d'un instrument de musique ou un cours de danse ou de patin artistique avec arrimage à la musique. De toute évidence, ces activités peuvent modifier la sensibilité à la musique et les habiletés auditives chez l'enfant.

Une limite de cette recherche est que seule la période de l'indice visuel a été considérée pour l'analyse EEG. Des analyses ultérieures seront conduites pour les périodes d'encodage et de réponse, qui apporteront peut-être des explications complémentaires à nos résultats. Il serait possible d'observer, par exemple, une différence d'attention auditive entre enfants entraînés musicalement et enfants non-musiciens au moment de l'encodage auditif. Cependant, il est important de rappeler que la période la plus critique pour le rappel est celle qui suit l'apparition de l'indice visuel, ce qui indique que la période la plus importante a été considérée dans cette recherche.

Une des forces de cette recherche est d'avoir mesuré l'activité neurologique chez l'enfant, avec tous les défis techniques que cela suppose, pour une activité cognitive complexe. Le taux de rétention des participants a été élevé, car le suivi pour les 2 séances a été fait sans relâche. Une autre force de cette recherche réside dans le protocole expérimental. Les études EEG qui ont une condition contrôle ne sont pas si nombreuses, et pourtant, cette condition est essentielle pour démontrer que les effets observés résultent bien des fonctions ciblées, comme le rappel actif dans cette recherche. Le choix de stimuli verbaux et non musicaux contribue aussi à la force du protocole en permettant d'obtenir l'équivalence des résultats en condition contrôle.

Ultérieurement, une recherche sur le rappel actif pourrait être effectuée de façon longitudinale, de façon à écarter la possibilité que ces résultats soient attribuables à des habiletés acquises avant même le début de l'apprentissage musical. Il serait intéressant aussi de créer un test de discrimination auditive avec des syllabes et non des sons purs, de façon à solliciter les mêmes modalités sensorielles en perception et en mémorisation. Aussi, l'ajout d'autres groupes contrôles, tels qu'un groupe d'enfants pratiquant l'écoute de la musique sans apprentissage ou un groupe de danseurs, permettrait d'établir un lien plus causal entre la pratique musicale et ses effets.

L'apport majeur de cette recherche est de montrer que cette expérience musicale a un effet significatif sur le rappel actif auditif et les substrats neurologiques qui le supportent. Cette recherche apporte de solides évidences que la pratique musicale chez l'enfant conduit à des effets de plasticité cérébrale fonctionnelle liée à la mémoire.

CONCLUSION

Cette recherche suggère donc que la pratique du violon et du violoncelle chez l'enfant lui permet d'obtenir de meilleures performances sur le plan de la mémoire auditive avec un meilleur taux de succès et une plus grande rapidité de rappel actif auditif. Cette étude révèle aussi des différences cérébrales significatives entre les enfants musiciens et non-musiciens sur une tâche de rappel actif auditif.

Les résultats de cette recherche démontrant les bienfaits mnésiques de l'apprentissage de la musique méritent d'être diffusés tant dans le milieu scientifique que celui de l'éducation. Ils amènent des arguments de poids aux enseignants en musique pour défendre leur point de vue devant les conseils scolaires afin de maintenir les cours de musique dans les écoles. Les premières personnes à en bénéficier seront les enfants, nos adultes de demain, mais aussi l'ensemble de la société. Alors que dans des pays reconnus pour la qualité de leur système éducatif tel que la Suisse, la Finlande et le Japon la musique est une des assises du programme pédagogique, la situation alarmante de la place accordée à l'éducation musicale au Québec exige que l'on s'en préoccupe. Devant le choix de la discipline artistique enseignée en continuité dans le cursus scolaire, les commissions scolaires doivent s'appuyer sur des arguments issus de la recherche en science et en éducation. L'aventure ne fait donc que commencer...

ANNEXE A : QUESTIONNAIRE PARENT

FICHE D'IDENTIFICATION – page 1 (confidentielle)

Code du participant : _____

Sexe : _____ Niveau scolaire : _____

Date de naissance : _____

Adresse postale des parents :

Adresse courriel des parents : _____

Tél. : _____ Autre tél. : _____

Votre enfant porte-t-il des lunettes? OUI NON

Votre enfant prend-il une médication sur une base régulière? OUI NON

Si oui, laquelle? _____

Votre enfant perçoit-il les couleurs? OUI NON

Votre enfant porte-t-il un implant métallique suite à une chirurgie médicale?

Votre enfant parle-t-il couramment le français? OUI NON

Niveau de scolarité des parents :

Parent 1 : Secondaire	Collégial	Universitaire
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Parent 2 : Secondaire	Collégial	Universitaire
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

FICHE D'IDENTIFICATION – page 2
(confidentielle)

Code du participant : _____

SECTION — ENFANTS MUSICIENS :

Votre enfant pratique le violon depuis combien de mois?

(considérer 10 mois de cours particuliers par année) :

À quelle fréquence votre enfant pratique-t-il son violon à la maison?

2 x 15 min/semaine

3 x 15 min/semaine

4 x 15 min/semaine

5 x 15 min et plus

À quelle fréquence votre enfant pratique-t-il son violon à l'école?

1 x 15 min/semaine

2 x 15 min/semaine

3 x 15 min/semaine

4 x et plus

Ne s'applique pas

Votre enfant suit-il des cours de théorie musicale en supplément de son cours individuel d'instrument? OUI NON

FICHE D'IDENTIFICATION – page 3
(confidentielle)

Code du participant : _____

SECTION — ENFANTS NON-MUSICIENS :

Votre enfant est-il inscrit à un cours de musique privé? OUI NON

Si votre enfant a des cours de musique de groupe à l'école,
est-ce à raison de plus de deux fois par semaine? OUI NON

Doit-il exercer une pratique quotidienne supplémentaire
sur un instrument à la maison? OUI NON

Espace réservé à l'expérimentatrice (autres cours suivis dans d'autres disciplines,
autres instruments pratiqués il y a quelques années, cours de théorie/chant choral,
acculturation musicale, etc.)

Dominance manuelle : _____

ANNEXE B : FORMULAIRE DE CONSENTEMENT



FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT (sujet mineur)

*«Plasticité et développement cérébral du rappel actif auditif :
effets de la pratique violonistique chez l'enfant»*

IDENTIFICATION

Responsable du projet : Anik Paquet
Département, centre ou institut : Département des sciences de l'activité physique
Adresse postale : CP 8888, succ. Centre-ville, Montréal H3C 3P8
Adresse courriel : paquet.anik@courrier.uqam.ca
Membres de l'équipe de recherche :
Anik Paquet, France Simard et Geneviève Cadoret

BUT GÉNÉRAL DU PROJET

Votre enfant est invité à prendre part à ce projet visant à examiner si la pratique du violon favorise le développement de la mémoire auditive et des bases neurologiques qui la supportent. La contribution de votre enfant favorisera l'avancement des connaissances dans le domaine des neurosciences cognitives ainsi que celui de l'apprentissage scolaire.

PROCÉDURE(S)

Avec votre permission et l'accord de votre enfant, ce dernier participera à deux visites. La première visite d'une durée de 60 minutes comprend la passation de petits tests (latéralité, oreille absolue, test d'audition/discrimination et mémoire auditive), la lecture et la signature du formulaire de consentement. Le test de latéralité comprend 5 petites tâches manuelles par exemple « Prends cette brosse à dents et fais semblant de te brosser les dents ». Un petit test d'identification de 3 notes entendues servira à nous indiquer si l'enfant a l'oreille absolue. Le test d'audition nous permettra de mesurer son seuil d'audition afin de nous assurer qu'il entendra clairement les stimuli lors de la séance en laboratoire et de mesurer sa capacité de discrimination entre deux rythmes ou deux fréquences. Enfin, le test de mémoire auditive évaluera ses capacités mnésiques.

Lors de la deuxième visite d'une durée de 90 minutes, l'enfant sera invité à l'université; une période de familiarisation de votre enfant avec le laboratoire est prévue ainsi qu'une courte période d'entraînement suivit de l'enregistrement des potentiels évoqués à partir de la tâche de mémoire auditive.

CRITÈRES DE SÉLECTION

Pour participer, votre enfant doit répondre aux critères suivants :

- Il est âgé de 7 à 10 ans;
- Il comprend et parle bien le français;
- Il a un seuil de conduction auditive de ≤ 20 dB;

Si votre enfant est musicien :

- Il reçoit des leçons privées hebdomadaires de violon (ratio : 1 enseignant/1 élève) depuis au moins 14 mois;
- Il exerce une pratique constante de son instrument au moins 3 fois par semaine durant au moins 20 minutes chaque séance et ce, jusqu'au début de la collecte de données de la présente étude.

Si votre enfant n'est pas musicien :

- Il ne suit pas de cours de musique privés, mais peut avoir reçu des cours de groupe de musique durant moins de 3 ans à raison d'un maximum d'une fois par semaine sans entraînement quotidien supplémentaire (par exemple à l'école).

Votre enfant NE PEUT PAS participer s'il répond aux critères suivants :

- Il est gaucher;
- Il ne différencie pas les couleurs rouge et vert;
- Il a reçu un diagnostic de troubles neurologiques;
- Il a un handicap visuel, moteur ou auditif;
- Il est porteur d'implants métalliques ou cochléaires à la suite d'une chirurgie médicale;
- Il prend des médicaments pouvant nuire à ses performances ou à la réalisation de la tâche;
- Il a l'oreille absolue.

AVANTAGES ET RISQUES D'INCONFORT

Pour tous les sujets, la participation au projet leur permet de contribuer au développement des connaissances sur le cortex préfrontal, d'être sensibilisés à la recherche scientifique tout en s'appliquant à faire une tâche amusante. La participation à cette étude leur permet aussi d'exercer leur mémoire.

Il n'y a aucun danger pour les sujets. L'exécution d'une tâche faite sur ordinateur est une technique non invasive déjà observée dans d'autres recherches. Les tâches demandées sont faciles d'exécution. Les questionnaires et les différents tests ne portent également aucun préjudice et sont faciles à réaliser. Au point de vue de la technique des potentiels évoqués, ce protocole est couramment utilisé chez les enfants, même chez les nourrissons. Le seul inconvénient lié à ce genre de protocole réside dans le fait que l'enfant doit porter un casque qui s'apparente à celui d'un casque de bain et il est invité à bouger le moins possible pendant les enregistrements, ce qui peut être légèrement restrictif. Aussi, pour améliorer la qualité des

enregistrements, nous devons appliquer un gel électrolytique au niveau de chaque électrode, ce qui a pour effet, lors de l'enlèvement du casque, de laisser quelques traces de gel au niveau du cuir chevelu (Parker, laboratory inc.) qui part aisément avec un shampoing. Enfin, si l'enfant ressent de l'inconfort à se retrouver seul dans une petite pièce fermée lors des enregistrements, il pourra être accompagné d'un parent/adulte.

ANONYMAT ET CONFIDENTIALITÉ

Il est entendu que les renseignements recueillis lors de l'expérimentation sont confidentiels et que seuls les membres de l'équipe de recherche auront accès aux résultats de votre enfant. Les documents liés à la recherche (formulaire de consentement, fichiers) seront conservés dans le laboratoire de l'UQAM de Geneviève Cadoret (SB 4411), sous-clés dans une armoire, jusqu'à ce que les résultats de la recherche soient publiés. Tous les documents relatifs à l'étude (fichiers avec les données, questionnaires, formules de consentement) seront détruits 5 ans après les dernières publications.

PARTICIPATION VOLONTAIRE

La participation de votre enfant à ce projet est volontaire. Cela signifie que même si vous consentez aujourd'hui à ce que votre enfant participe à cette recherche, il demeure entièrement libre de ne pas participer ou de mettre fin à sa participation en tout temps sans justification ni pénalité. Vous pouvez également retirer votre enfant du projet en tout temps.

Votre accord à participer implique également que vous acceptez que l'équipe de recherche puisse utiliser aux fins de la présente recherche (articles, conférences et communications scientifiques) les renseignements recueillis à la condition qu'aucune information permettant d'identifier votre enfant ne soit divulguée publiquement.

COMPENSATION

Les enfants recevront une carte-cadeau accompagnée d'un certificat de remerciement pour leur participation.

DES QUESTIONS SUR LE PROJET OU SUR VOS DROITS?

Vous pouvez contacter la chercheuse principale au numéro (514) 717-8644 pour des questions additionnelles sur le projet, d'éventuelles inquiétudes, ou sur vos droits ou sur ceux de votre enfant en tant que participant de recherche. Le Comité d'éthique de la recherche pour les projets étudiants impliquant des êtres humains (CERPÉ) de l'UQAM a approuvé le projet de recherche auquel votre enfant va participer.

Pour des informations concernant les responsabilités de l'équipe de recherche sur le plan de l'éthique de la recherche ou pour formuler une plainte ou des commentaires, vous pouvez contacter le CERPÉ par le biais de sa coordonnatrice au numéro (514) 987-3000 # 1646.

REMERCIEMENTS

Votre collaboration et celle de votre enfant sont essentielles à la réalisation de notre projet et l'équipe de recherche tient à vous en remercier. Si vous souhaitez obtenir un résumé écrit des principaux résultats de cette recherche, veuillez ajouter vos coordonnées ci-dessous.

AUTORISATION PARENTALE

En tant que parent ou tuteur légal de _____, je reconnais avoir lu le présent formulaire de consentement et consens volontairement à ce que mon enfant participe à ce projet de recherche. Je reconnais aussi que le chercheur responsable a répondu à mes questions de manière satisfaisante, et que j'ai disposé suffisamment de temps pour discuter avec mon enfant de la nature et des implications de sa participation. Je comprends que sa participation à cette recherche est totalement volontaire et qu'il peut y mettre fin en tout temps, sans pénalité d'aucune forme ni justification à donner. Il lui suffit d'en informer un membre de l'équipe. Je peux également décider, pour des motifs que je n'ai pas à justifier, de retirer mon enfant du projet.

Signature de l'enfant : _____ Date : _____

Signature du parent : _____ Date : _____

Nom (lettres moulées) et coordonnées : _____

Signature du responsable du projet ou de son, sa délégué(e) :

Date : _____

Veuillez conserver le premier exemplaire de ce formulaire de consentement pour communication éventuelle avec l'équipe de recherche et remettre le second à l'équipe de recherche.

Groupe en éthique
de la recherche

Piloter l'éthique de la recherche humaine

EPTC 2: FER

Certificat d'accomplissement

Ce document certifie que

Anik Paquet

*a complété le cours : l'Énoncé de politique des trois Conseils :
Éthique de la recherche avec des êtres humains :
Formation en éthique de la recherche (EPTC 2 : FER)*

9 mars, 2015

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abromont, C. et De Montalembert, E. (2001). *Guide de la théorie de la musique*.
- Aguera, P.-E., Jerbi, K., Caclin, A. et Bertrand, O. (2011). ELAN: A software package for analysis and visualization of MEG, EEG, and LFP signals. *Computational Intelligence and Neuroscience*, doi: 10.1155/2011/158970.
- Arterberry, M. E., Milburn, M. M., Loza, H. L. et Willert, A. S. (2001). Retrieval of episodic information from memory: comparison among 3- and 4- year olds, 7- and 8- year olds, and adults. *Journal of Cognition and Development*, 2(3), 283-305.
- Auzias, M. (1984). *Enfants gauchers, enfants droitiers*. Neuchâtel, Suisse: Delachaux and Niestlé S.A.
- Baddeley, A. (2012). Working memory: theories, models, and controversies. *The Annual Review of Psychology*, 63, 1-29. doi:10.1146/annurev-psych-120710-100422
- Bailey, J. A. et Penhune, V. B. (2010). Rhythm synchronization performance and auditory working memory in early- and late-trained musicians. *Exp Brain Res*, 204(1), 91-101. doi:10.1007/s00221-010-2299-y
- Bailey, J. A., Zatorre, R. J. et Penhune, V. B. (2014). Early musical training is linked to gray matter structure in the ventral premotor cortex and auditory-motor rhythm synchronization performance. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(4), 755-767. doi:10.1162/jocn_a_00527
- Barrett, K. C., Ashley, R., Strait, D. L. et Kraus, N. (2013). Art and science: how musical training shapes the brain. *Frontiers in Psychology*, 4, 713. doi:10.3389/fpsyg.2013.00713
- Bauer, P. (2006). *Event memory*. (N. J. Hoboken Ed. John Wiley & Sons, Inc ed. Vol. 2, Cognition, perception an language).
- Benassi-Werke, M. E., Queiroz, M., Araujo, R. S., Bueno, O. F. et Oliveira, M. G. (2012). Musicians' working memory for tones, words, and pseudowords. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65(6), 1161-1171. doi:10.1080/17470218.2011.644799
- Bergman Nutley, S., Darki, F. et Klingberg, T. (2014). Music practice is associated with development of working memory during childhood and adolescence. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 926. doi:10.3389/fnhum.2013.00926
- Berti, S., Münzer, S., Schröger, E. et Pechmann, T. (2006). Different Interference Effects in Musicians and a Control Group. *Experimental Psychology*, 53(2), 111-116. doi:10.1027/1618-3169.53.2.111
- Besson, M., Chobert, J. et Marie, C. (2011). Transfer of Training between Music and Speech: Common Processing, Attention, and Memory. *Front Psychol*, 2, 94. doi:10.3389/fpsyg.2011.00094
- Blain-Briere, B., Bouchard, C., Bigras, N. et Cadoret, G. (2013). Development of active control within working memory: Active retrieval versus monitoring in

- children. *International Journal of Behavioral Development*, 38(3), 239-246.
doi:10.1177/0165025413513202
- Brosch, T., Pourtois, G. et Sander, D. (2010). The perception and categorisation of emotional stimuli: A review. *Cognition & Emotion*, 24(3), 377-400.
doi:10.1080/02699930902975754
- Cadoret, G., Bruce, P. G. et Petrides, M. (2001). Selective activation of the ventrolateral prefrontal cortex in the human brain during active retrieval processing. *European Journal of neuroscience*, 14, 1164-1170.
- Cadoret, G. et Petrides, M. (2007). Ventrolateral prefrontal neuronal activity related to active controlled memory retrieval in nonhuman primates. *Cerebral Cortex*, 17 Suppl 1, i27-40. doi:10.1093/cercor/bhm086
- Chapados, C. et Petrides, M. (2015). Ventrolateral and dorsomedial frontal cortex lesions impair mnemonic context retrieval. *Proceedings. Biological Sciences*, 282(1801). doi:10.1098/rspb.2014.2555
- Chen, J. L., Penhune, V. B. et Zatorre, R. J. (2008). Moving on time: brain network for auditory-motor synchronization is modulated by rhythm complexity and working memory. *Journal of cognitive neuroscience*, 20(2), 226-239.
- D'Allessandro, C. (2010). *Analyse des différents stimuli auditifs: musique, langage et bruit. Étude comparative.* (DeBoeck ed.).
- Damasio, A. R. (1994). *Descartes' Error: Emotion, Reason, and The Human Brain.* Paris.
- Darwin, C., Turvey, M. T. et Crowder, R. G. (1972). An auditory analogue of the Sperling partial report procedure: Evidence for brief auditory storage. *Cognitive Psychology*, 3(2), 255-267.
- Daviault, D. (2011). *L'émergence et le développement du langage chez l'enfant* (Chenelière Éducation ed.). Montreal, Quebec, Canada.
- Dehaene, S. et Changeux, J. P. (2011). Experimental and theoretical approaches to conscious processing. *Neuron*, 70(2), 200-227.
- DesPins, J.-P. (1996). *Musique et comportement humain.* Musique. Université du Québec à Montréal.
- Deutsch, D. (2013). *The Processing of Pitch Combinations* (D. D. éditions Ed.). New York: Academic Press.
- Dionne, J. et Cadoret, G. (2013). Development of active controlled retrieval during middle childhood. *Developmental Psychobiology*, 55(4), 443-449.
doi:10.1002/dev.21034
- Dodane, C. (2011). Production de la parole. *E33SLM*.
- Eimas, P. D., Siqueland, E. R., Jusczyk, P. et Vigorito, J. (1971). Speech perception in infants. *Science, New series*, 171(3968), 303-306.
- Fivush, R., Gray, J. T. et Fromhoff, F. A. (1987). Two-years-olds talk about the past. *Cognitive development*, 2, 393-409.
- Fivush, R. et Kuebli, J. (1992). The structure of events and event representations: a developmental analysis. *Child development*, 63, 188-201.
- Flanagan, P. D. et Kaufman, S. A. (2004). *Essentials of WISC-IV Assessment* (pp. 1-15). Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley and Sons, Inc.
- Fourneret, P. (2017). Approche développementale des fonctions exécutives: du bébé à l'adolescence. *Archives de pédiatrie 2017, Eselvier Masson*, 24, 66-72.

- Fujioka, T., Ross, B., Kakigi, R., Pantev, C. et Trainor, J. L. (2006). One year of musical training affects development of auditory cortical-evoked fields in young children. *Brain*, *129*, 2593-2608.
- Gaser, C. et Schlaug, G. (2003). Brain structures differ between musicians and non-musicians. *Journal of neurosciences*, *23*(27), 9240-9245.
- George, E. M. et Coch, D. (2011). Music training and working memory: an ERP study. *Neuropsychologia*, *49*(5), 1083-1094.
doi:10.1016/j.neuropsychologia.2011.02.001
- Gordon, E. E. (1979, 1986). Primary Measures of Music Audiation. Chicago, Illinois: GIA Publications inc.
- Gromko, J. E., Hansen, D., Tortora, A. H., Higgins, D. et Boccia, E. (2009). Effects of Temporal Sequencing and Auditory Discrimination on Children's Memory Patterns for Tones, Numbers, and Nonsense Words. *Journal of Research in Music Education*, *57*(2), 140-151. doi:10.1177/0022429409335891
- Groussard, M., La Joie, R., Rauchs, G., Landeau, B., Chetelat, G., Viader, F., Desgranges, B., Eustache, F. et Platel, H. (2010). When music and long-term memory interact: effects of musical expertise on functional and structural plasticity in the hippocampus. *PLoS One*, *5*(10).
doi:10.1371/journal.pone.0013225
- Guérit, J.-M. (1998). *Les potentiels évoqués* (Masson Ed. Vol. 3e édition). Paris.
- Habib, M. et Commeiras, C. (2014). *Méloydys: remédiation cognitivo-musicale des troubles d'apprentissage*. Paris.
- Habibi, A., Cahn, B. R., Damasio, A. et Damasio, H. (2016). Neural correlates of accelerated auditory processing in children engaged in music training. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *21*, 1-14.
- Habibi, A., Cahn, B. R., Damasio, A. et Damasio, H. (2017). Neural correlates of accelerated auditory processing in children engaged in music training. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *21*, 1-14.
- Habibi, A., Ilari, B., Crimi, K., Metke, M., Kaplan, J. T., Joshi, A. A., Leahy, R. M., Shattuck, D. W., Choi, S. Y., Halder, J. P., Ficek, B., Damasio, A. et Damasio, H. (2014). An equal start: absence of group differences in cognitive, social, and neural measures prior to music or sports training in children. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 690. doi:10.3389/fnhum.2014.00690
- Hamond, N. R. et Fivush, R. (1991). Memories of Mickey Mouse: young children recount their trip to Disney World. *Cognitive development*, *6*, 433-448.
- Ho, Y.-C., Cheung, M.-C. et Chan, A. S. (2003). Music training improves verbal but not visual memory: Cross-sectional and longitudinal explorations in children. *Neuropsychology*, *17*(3), 439-450. doi:10.1037/0894-4105.17.3.439
- Howe, M. L. (2015). Memory development in Handbook of Child Psychology and Developmental Science. In W. O. Libary (Ed.), *7th edition* (Vol. 2, pp. 1-47): John Wiley and Sons Inc.
- Hyde, K. L., Lerch, J., Norton, A., Forgeard, M., Winner, E., Evans, A. C. et Schlaug, G. (2009). Musical training shapes structural brain development. *Journal of Neuroscience*, *29*(10), 3019-3025. doi:10.1523/JNEUROSCI.5118-08.2009

- Jefferies, E. et Lambon Ralph, M. A. (2006). Semantic impairment in stroke aphasia versus semantic dementia: a case-series comparison. *Brain*, 129(Pt 8), 2132-2147. doi:10.1093/brain/awl153
- Kandel, E. (2007). *À la recherche de la mémoire; une nouvelle théorie de l'esprit* (M. Filoche, Trans. Odile Jacob ed.). Paris, France.
- Kostopoulos, P., Albanese, M. C. et Petrides, M. (2007). Ventrolateral prefrontal cortex and tactile memory disambiguation in the human brain. *Proceedings of National Academy of Sciences*, 104(24), 10223-10228. doi:10.1073/pnas.0700253104
- Kostopoulos, P. et Petrides, M. (2003). The mid-ventrolateral prefrontal cortex: insights into its role in memory retrieval. *European Journal of Neuroscience*, 17(7), 1489-1497. doi:10.1046/j.1460-9568.2003.02574.x
- Kraus, N., Slater, J., Thompson, E. C., Hornickel, J., Strait, D. L., Nicol, T. et White-Schwoch, T. (2014). Auditory learning through active engagement with sound: biological impact of community music lessons in at-risk children. *Frontiers in Neuroscience*, 8, 351. doi:10.3389/fnins.2014.00351
- Kraus, N., Strait, D. L. et Parbery-Clark, A. (2012). Cognitive factors shape brain networks for auditory skills: spotlight on auditory working memory. *Ann N Y Acad Sci*, 1252, 100-107. doi:10.1111/j.1749-6632.2012.06463.x
- Lécuyer, R., Pêcheux, M.-G. et Streri, A. (1994). *Le développement cognitif du nourrisson*. Paris.
- Lee, Y.-s., Lu, M.-j. et Ko, H.-p. (2007). Effects of skill training on working memory capacity. *Learning and Instruction*, 17(3), 336-344. doi:10.1016/j.learninstruc.2007.02.010
- Lidji, P. (2008). *Musique et langage: spécificités, interactions et associations spatiales*. (Doctorat), Bruxelles et Montréal.
- Luria, A. (1978). *Les fonctions corticales supérieures de l'homme*. (N. Heissler et G. Semenov-Ségur, Trans.).
- Mandler. (1983). Organization and Information Retrieval. *Journal of experimental psychology*, 9(3), 430-439.
- Miyashita, Y. (2004a). Neural mechanisms of cognitive memory. *Keio Journal of Medicine*, 53(2), 59-68.
- Miyashita, Y. (2004b). Cognitive memory: cellular and network machineries and their top-down control. *Science, New series*, 306, 435-440.
- Moreno, S., Lee, Y., Janus, M. et Bialystok, E. (2015). Short-term second language and music training induces lasting functional brain changes in early childhood. *Child Development*, 86(2), 394-406. doi:10.1111/cdev.12297
- Moreno, S., Marques, C., Santos, A., Santos, M., Castro, S. L. et Besson, M. (2009). Musical training influences linguistic abilities in 8-year-old children: more evidence for brain plasticity. *Cereb Cortex*, 19(3), 712-723. doi:10.1093/cercor/bhn120
- Moussard, A., Rochette, F. et Bigand, E. (2012). La musique comme outil de stimulation cognitive. *L'année psychologique*, 112, 499-542. doi:10.4074/
- O'Reilly, R. C. (2010). The What and How of prefrontal cortical organization. *Trends in neurosciences*, 33, 355-361.

- Pantev, C., Oostenveld, R., Engelien, A., Ross, B., Roberts, L. E. et Hoke, M. (1998). Increased auditory cortical representations in musicians. *Nature*, 392, 811-814.
- Parbery-Clark, A., Strait, D. L. et Kraus, N. (2013). Musical training enhance neural processing of binaural sounds. *The journal of neuroscience*, 33(42), 16741-16747. doi:10.1523/JNEUROSCI.5700-12.2013
- Patel, A. D. (2011). Why would Musical Training Benefit the Neural Encoding of Speech? The OPERA Hypothesis. *Front Psychol*, 2, 142. doi:10.3389/fpsyg.2011.00142
- Patel, A. D. et Iversen, J. R. (2007). The linguistic benefits of musical abilities. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(9), 369-372. doi:10.1016/j.tics.2007.08.003
- Penhune, V. B. (2011). Sensitive periods in human development: evidence from musical training. *Cortex*, 47(9), 1126-1137. doi:10.1016/j.cortex.2011.05.010
- Petrides, M. (2002). The Mid-ventrolateral Prefrontal Cortex and Active Mnemonic Retrieval. *Neurobiology of Learning and Memory*, 78(3), 528-538. doi:10.1006/nlme.2002.4107
- Petrides, M. (2005). Lateral prefrontal cortex: architectonic and functional organization. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1456), 781-795. doi:10.1098/rstb.2005.1631
- Platel, H. (2010). *Anatomie fonctionnelle de la perception et de la mémoire musicale* (de Boeck ed.). Paris.
- Platon. (1578). *Timée*. Paris: Henri Estienne.
- Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical neurophysiology*, 118, 2128-2148.
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A.-S., McNamara, J. O. et White, L. E. (2011). *Neurosciences* (DeBoeck ed. Vol. 4). Bruxelles, Belgique.
- Sanes, D. H. et Woolley, S. M. (2011). A behavioral framework to guide research on central auditory development and plasticity. *Neuron*, 72(6), 912-929. doi:10.1016/j.neuron.2011.12.005
- Schellenberg, E. G. et Trehub, S. E. (2003). Good Pitch Memory Is Widespread. *Psychological Science*, 14(3), 262-266. doi:10.1111/1467-9280.03432
- Schlaug, G., Norton, A., Overy, K. et Winner, E. (2005). Effects of music training on the child's brain and cognitive development. *Ann N Y Acad Sci*, 1060, 219-230. doi:10.1196/annals.1360.015
- Schneider, P., Scherg, M., Dosch, H. G., Specht, H. J., Gutschalk, A. et Rupp, A. (2002). Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians. *Nature Neuroscience*, 5(7), 688-694. doi:10.1038/nn871
- Schneider, W., Eschman, A. et Zuccolotto, A. (2007). E-Prime 2.
- Schulze, K. et Koelsch, S. (2012). Working memory for speech and music. *Ann N Y Acad Sci*, 1252, 229-236. doi:10.1111/j.1749-6632.2012.06447.x
- Schulze, K. et Tillmann, B. (2013). Working memory for pitch, timbre, and words. *Memory*, 21(3), 377-395. doi:10.1080/09658211.2012.731070

- Shahin, A. J., Alain, C. et Picton, T. W. (2006). Scalp Topography and Intercerebral Source for ERPs Recorded During Auditory Target Detection. *Brain Topography*, 19(1/2), 89-105. doi:10.1007/s10548-006-0015-9
- Skoe, E. et Kraus, N. (2012). A little goes a long way: how the adult brain is shaped by musical training in childhood. *Journal of Neuroscience*, 32(34), 11507-11510. doi:10.1523/JNEUROSCI.1949-12.2012
- Skoe, E. et Kraus, N. (2013). Musical training heightens auditory brainstem function during sensitive periods in development. *Frontiers in Psychology*, 4, 622. doi:10.3389/fpsyg.2013.00622
- Slevc, R. L. et Miyake, A. (2006). Individual differences in second-language proficiency. *Psychological Science*, 17(8), 675-681.
- Steele, C. J., Bailey, J. A., Zatorre, R. J. et Penhune, V. B. (2013). Early musical training and white-matter plasticity in the corpus callosum: evidence for a sensitive period. *Journal of Neuroscience*, 33(3), 1282-1290. doi:10.1523/JNEUROSCI.3578-12.2013
- Strait, D. L. et Kraus, N. (2014). Biological impact of auditory expertise across the life span: musicians as a model of auditory learning. *Hear Res*, 308, 109-121. doi:10.1016/j.heares.2013.08.004
- Strait, D. L., O'Connell, S., Parbery-Clark, A. et Kraus, N. (2014). Musicians' enhanced neural differentiation of speech sounds arises early in life: developmental evidence from ages 3 to 30. *Cerebral Cortex*, 24(9), 2512-2521. doi:10.1093/cercor/bht103
- Strait, D. L., Parbery-Clark, A., Hittner, E. et Kraus, N. (2012). Musical training during early childhood enhances the neural encoding of speech in noise. *Brain Lang*, 123(3), 191-201. doi:10.1016/j.bandl.2012.09.001
- Strait, D. L., Parbery-Clark, A., O'Connell, S. et Kraus, N. (2013). Biological impact of preschool music classes on processing speech in noise. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 6, 51-60. doi:10.1016/j.dcn.2013.06.003
- Strait, D. L., Slater, J., O'Connell, S. et Kraus, N. (2015). Music training relates to the development of neural mechanisms of selective auditory attention. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 12C, 94-104. doi:10.1016/j.dcn.2015.01.001
- Trainor, J. L., Shahin, A. et Roberts, E. L. (2003). Effects of musical training on the auditory cortex in children. *Annals of New York Academy of Sciences*, 999, 506-513. doi:10.1196/annals.1284.061
- Wan, Y. C. et Schlaug, G. (2013). Brain Plasticity Induced by Musical Training. *HHS Public Access*, 565-581. doi:10.1016/b978-0-12-381460-9.00014-6
- Weschler, D. (2005). WISC-IV, Échelle d'intelligence de Weschler pour enfants et adolescents (4e édition ed.): Pearson.
- Whitton, J. P. et Polley, D. B. (2011). Evaluating the perceptual and pathophysiological consequences of auditory deprivation in early postnatal life: a comparison of basic and clinical studies. *Journal of the Association Research in Otolaryngology*, 12(5), 535-547. doi:10.1007/s10162-011-0271-6
- Zatorre, R. (2003). Absolute pitch: a model for understanding the influence of genes and development on neural and cognitive function. *Nature Neuroscience*, 6(7), 692-695.

Zuk, J., Benjamin, C., Kenyon, A. et Gaab, N. (2014). Behavioral and Neural Correlates of Executives Functioning in Musicians and Non-Musicians. *PLoS ONE*, 9(6), e99868. doi:10.1371